

# Термоэлектрические источники альтернативного электропитания

Двадцатый, да и начало двадцать первого века по праву называют эпохой электричества. Действительно, трудно представить какую-либо отрасль деятельности человека, куда бы не проникли технологии, энергетическое обеспечение которых осуществляется с помощью электрической энергии. Расширение сфер применения электричества заставляет человечество тратить год от года все большие ресурсы на поиск новых источников электроэнергии. Одним из перспективных направлений развития альтернативных источников электрической энергии является разработка и производство термоэлектрических источников энергии, основанных на эффекте Зеебека. Термоэлектрические источники энергии в течение многих десятилетий незаслуженно пребывали в практическом забвении: с момента открытия термоэлектричества до начала его практического применения прошло более 120 лет.

Пётр ШОСТАКОВСКИЙ  
info@kryotherm.ru

## Немного истории

Возникновение контактной разности потенциалов при соприкосновении двух разнородных проводников, открытое Алессандро Вольта в последнем десятилетии XVIII века, привлекло внимание многих физиков к процессам, протекающим в цепях разнородных материалов.

Днем рождения термоэлектричества можно считать 14 декабря 1820 г. В этот день на заседании Берлинской академии наук академик Томас Иоганн Зеебек (рис. 1) впервые доложил о наблюдении им отклонения магнитной стрелки компаса вблизи замкнутой цепи из двух разнородных металлов, один спай которых нагревался (рис. 2). Томас

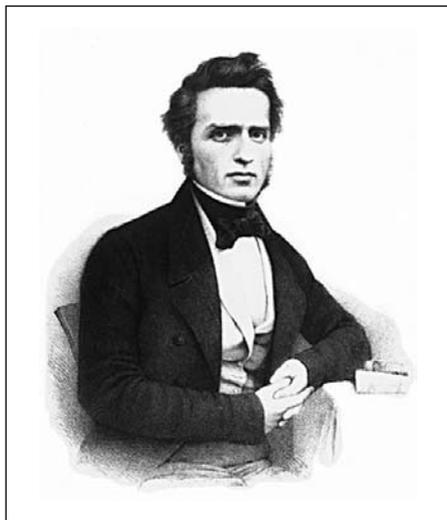


Рис. 1. Томас Иоганн Зеебек (Thomas Johann Seebeck) (1770–1831)

Зеебек называл этот эффект «термомагнетизмом». Позже, в 1822 г., в докладах Прусской академии наук был опубликован научный труд Томаса Зеебека «К вопросу о магнитной поляризации некоторых материалов и руд, возникающей в условиях разности температур».

В своих опытах Томас Зеебек использовал контакт двух различных материалов (конструктивно выполненных в виде проволоки, пластин и/или стержней) из различных металлов, в частности из меди, висмута и сурьмы.

Суть явления, которое вошло впоследствии в физику под термином «эффект Зеебека» (рис. 2), состояла в том, что при замыкании концов цепи, состоящей из двух разнородных металлических материалов, спаи которых (обозначенные на рис. 2 m-p и n-o) находились при разных температурах, магнитная стрелка (а), помещенная вблизи такой цепи, поворачивалась так же, как и в присутствии магнитного материала. В результате Зеебек наблюдал возникновение магнитного поля, которое фиксировалось по отклонению маг-

нитной стрелки. Угол и направление поворота магнитной стрелки зависели от значения разности температур на спаях цепи и сочетания материалов, из которых была составлена цепь.

Эффективность термоэлектрического преобразования теплового потока в электрическую энергию для наилучшего сочетания значений термоэлектродвижущей силы (термоЭДС) рядов пар материалов, составленных самим первооткрывателем этого эффекта Томасом Зеебеком, могла достичь 2–3%, что значительно превосходило КПД паровых машин того времени. Неизвестно, каким путем пошло бы развитие энергетики, будь больше внимания уделено термоэлектричеству в те годы.

Сегодня термоэлектричество наверстывает незаслуженное вековое забвение в энергетике. Это ускоренное движение началось совсем недавно — в 30-е годы прошлого века благодаря работам А. Ф. Иоффе. Именно в эти годы была заложена основа развития современной термоэлектрической энергетики. Одним из первых выдающихся практических применений термоэлектрических полупроводниковых генераторов стал легендарный в тяжелые годы Великой Отечественной войны «Партизанский котелок» (ТГ-1, 1942 г.). Это устройство позволяло обеспечивать электрической энергией мощностью 2–4 Вт питание радиостанций партизанских отрядов и заменило труднодоступные и обладавшие в те времена малой емкостью гальванические батареи. Для получения электрической энергии было достаточно разности температур 250...300 °С над огнем костра при стабилизации температуры холодных спаев кипящей водой. Мировым термоэлектрическим со-

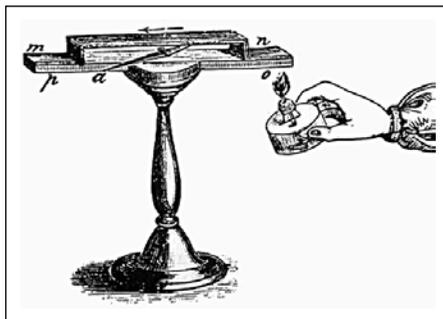


Рис. 2. Иллюстрация к опыту, демонстрирующему эффект Зеебека

**Таблица 1.** Список принятых обозначений и сокращений

| Принятые обозначения   | Расшифровка  | Единица измерения |
|------------------------|--|-------------------|
| $\alpha$               | Коэффициент Зеебека (коэффициент термоЭДС)   | В/К               |
| $N$                    | Число пар термоэлектрических элементов в модуле  | —                 |
| $h$                    | Высота термоэлектрического элемента  | м                 |
| $C$                    | Сторона поперечного сечения элемента   | м                 |
| $T_h$                  | Температура горячей (hot) спая модуля  | К                 |
| $T_c$                  | Температура холодного (cold) спая модуля   | К                 |
| $\Delta T$             | Разность температур  | К                 |
| $R_n$                  | Электрическое сопротивление нагрузки   | Ом                |
| $Q_h$                  | Энергия теплового потока, подаваемого на модуль (hot)  | Вт                |
| $R_{th}$               | Тепловое сопротивление между нагреваемой стороной ТГМ и источником теплоты с заданной температурой | К/Вт              |
| $Q_c$                  | Энергия теплового потока, отводимого с модуля (cold)   | Вт                |
| $R_c$                  | Тепловое сопротивление между охлаждаемой стороной и окружающей средой                              | К/Вт              |
| $U$                    | Напряжение на выходе модуля при $R_n = R$  | В                 |
| $I$                    | Электрический ток через нагрузку при $R_n = R$   | А                 |
| $P$                    | Электрическая мощность в нагрузке при $R_n = R$  | Вт                |
| $\eta$                 | Коэффициент полезного действия (эффективность) модуля  | —                 |
| $m$                    | Отношение сопротивлений нагрузки и модуля  | —                 |
| $R$                    | Внутреннее электрическое сопротивление модуля при рабочих температурах                             | —                 |
| $R(22^\circ\text{C})$  | Внутреннее электрическое сопротивление модуля в нормальных условиях                                | Ом                |
| $Rt(22^\circ\text{C})$ | Тепловое сопротивление модуля, измеренное при указанной температуре                                | К/Вт              |
| ТГМ                    | Термоэлектрический генераторный модуль   | —                 |
| ТЭГ                    | Термоэлектрический генератор   | —                 |
| ТЭЭ                    | Термоэлектрический элемент   | —                 |

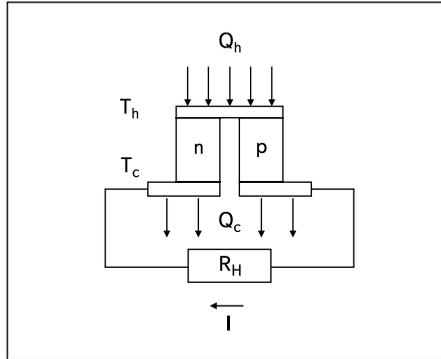
обществом общепризнан приоритет практического применения эффекта прямого преобразования тепловой энергии в электрическую за Советской Россией.

Для упрощения понимания используемых в последующих разделах обозначений и сокращений в таблице 1 приводится их единый перечень.

### Эффект Зеебека и его практическое применение

Как уже было отмечено, в основе термоэлектрической генерации лежит эффект Зеебека — термоэлектрический эффект, заключающийся в возникновении термоЭДС при нагреве контакта (спая) двух разнородных металлов или полупроводников (термопары). Напряжение термоЭДС  $E_{тэдс}$  прямо пропорционально коэффициенту Зеебека  $\alpha$  и разнице температур  $\Delta T$  между горячей  $T_h$  и холодной  $T_c$  сторонами (спаями) термоэлектрического модуля (рис. 3).

Представленная конструкция термопары состоит из разнородных полупроводниковых термоэлементов  $n$ - и  $p$ -типа, соединенных между собой на одной стороне, другие два свободных конца подключаются к нагрузке  $R_n$ . Если температура места контакта отлична от температуры свободных концов, то по та-



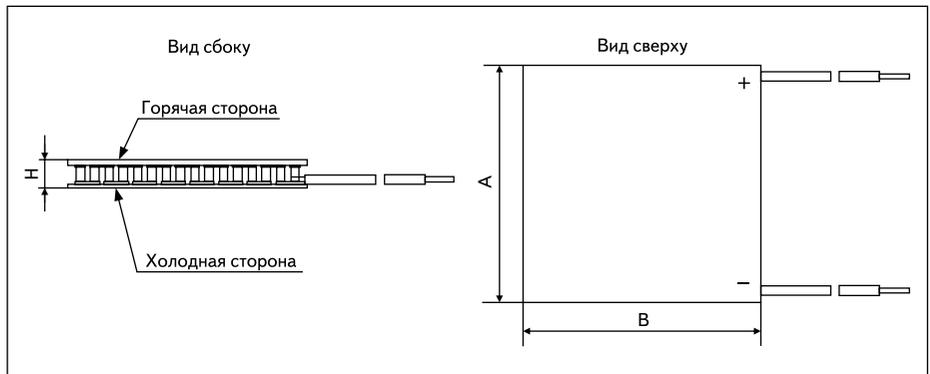
**Рис. 3.** Схематическое представление эффекта Зеебека на примере спая термоэлектрических элементов  $n$ - и  $p$ -типа

кой цепи пойдет ток, а на нагрузке будет выделяться полезная мощность. Величину термоЭДС можно определить по формуле:

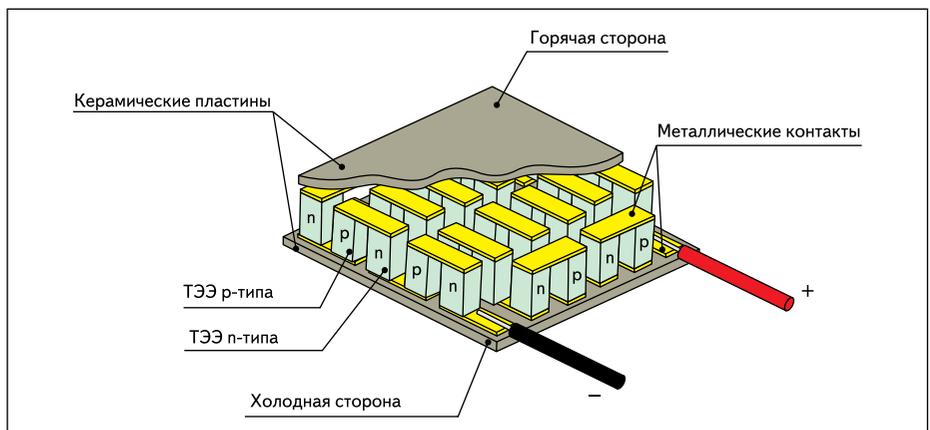
$$E_{тэдс} = \alpha \Delta T. \quad (1)$$

Для увеличения получаемых электрической мощности и напряжения термопары соединяют последовательно, при этом они образуют термобатарею, или термоэлектрический модуль, графическое изображение которого представлено на рис. 4 и 5.

Конструктивное исполнение стандартного генераторного модуля мало чем отлича-



**Рис. 4.** Чертеж термоэлектрического генераторного модуля



**Рис. 5.** Термоэлектрический генераторный модуль в разрезе

ется от холодильных термоэлектрических модулей. Между двух керамических пластин смонтированы электрически последовательно, а по тепловому потоку — параллельно термоэлектрические элементы  $n$ - и  $p$ -типа. (Более подробную информацию о холодильных термоэлектрических модулях и их применении можно найти в [11].) Модуль имеет ширину  $A$ , длину  $B$  и высоту  $H$  (рис. 4). Как правило, модуль поставляется с папаянными проводами.

### Обзор современных применений термоэлектрического преобразования

Развитие современной техники и технологий неразрывно связано с поиском новых источников энергии, в первую очередь — электрической. Основное требование — увеличить объем ее выработки, но в последнее время на передний план выходят дополнительные условия: энергия должна вырабатываться экологически чистым путем, должна быть возобновляемая и никак не связана с углеродом. Сегодня усилия многих ученых направлены на развитие «зеленой» энергетики, в которой особенно остро нуждаются Европа и США. Термоэлектрическая генерация является одним из перспективных, а в некоторых случаях единственно доступ-

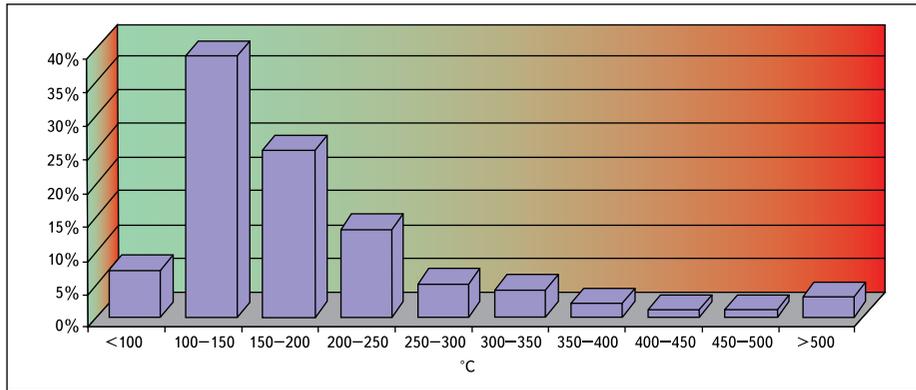


Рис. 6. Распределение температур поверхностей промышленных агрегатов

ным способом прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. В таком преобразовании отсутствует промежуточное звено, как, например, в работе тепловой или атомной электростанции, где тепловая энергия преобразуется в механическую, а затем механическая энергия преобразуется в электрическую.

За последние десятилетия в разных промышленно развитых странах были разработаны, испытаны и поставлены на серийное производство термоэлектрические генераторы (ТЭГ) мощностью от нескольких микроватт до десятков киловатт. Большинство ТЭГ предназначены для так называемой «малой энергетики». Они обладают такими уникальными качествами, как полная автономность, высокая надежность, простота эксплуатации, бесшумность и долговечность. ТЭГ используются для энергоснабжения объектов, удаленных от линий электропередачи, а также при целом ряде условий, где они являются единственно возможным источником электрической энергии.

Среди преимуществ, определяющих при выборе среди прочих приоритет термоэлектрического преобразования, во многих приложениях — это отсутствие движущихся частей и, как одно из следствий, отсутствие вибраций, а также необходимости применения жидкостей и/или газов под высоким давлением. (Преобразование происходит в самом термоэлектрическом веществе.) Работоспособность не зависит от пространственного положения и наличия гравитации.

ТЭГ можно применять при больших и малых перепадах температур. Последнее становится наиболее актуальным, если учесть, что до 90% сбрасываемой (отходящей) тепловой энергии выделяется на промышленных объектах и оборудовании при температуре поверхностей до 300 °C (рис. 6).

Термоэлектрическое преобразование универсально, оно допускает использование практически любых источников теплового потока, в том числе при малых перепадах температур, при которых применение иных способов преобразования невозможно. Совсем недавно практическое применение

получили устройства, утилизирующие энергию тепловых потоков при перепаде температуры менее 10 К.

До настоящего времени существенным ограничением преимуществ термоэлектрического преобразования остается относительно низкий коэффициент эффективности преобразования теплового потока в электрическую энергию — от 3 до 8%. Однако в ситуации, когда для относительно небольших нагрузок невозможно или экономически нецелесообразно подвести обычные линии электропередачи, ТЭГ становится незаменимым. Сферы таких применений крайне разнообразны: от энергообеспечения космических аппаратов, находящихся на удаленных от Солнца орбитах, а также питания оборудования газо- и нефтепроводов, морских навигационных систем и до бытовых генераторных устройств, например, в составе дровяной топочно-варочной печи, печи для сауны, камина и отопительного котла. Приведем еще несколько примеров практического применения ТЭГ:

- использование отводимого от двигателей (автомобильных, корабельных и др.) тепла;
- автономные источники питания электроэнергии для обеспечения работоспособности котельных, установок по переработке отходов и др.;
- источники питания для катодной защиты нефте- и газопроводов;
- преобразование тепла природных источников (например, геотермальных вод) в электрическую энергию;
- обеспечение питанием различных устройств телеметрии и автоматики на объектах, удаленных от линий электропередачи;
- измерение тепловых потоков (теплотемы);
- обеспечение автономным питанием маломощных электронных устройств (беспроводные датчики) за счет накапливаемой энергии (Energy Harvesting), собираемой при наличии минимальных перепадов температур (менее 10 °C);
- получение электрической энергии на солнечных концентраторах за счет разности температур горячего и охлажденного теплоносителя в контуре.

## Термоэлектрические генераторные сборки и устройства

Автономные источники электрической энергии на основе термоэлектрических генераторных модулей нашли широкое применение в различных областях деятельности человека. Мощность, вырабатываемая такими генераторами, составляет от единиц милливатт до единиц киловатт и определяется в конечном итоге экономической целесообразностью выбора этого способа преобразования энергии. Источником тепловой энергии может быть любая энергия, получаемая при сжигании природного газа, дров, угля, пеллет и др.

Термоэлектрическая генераторная сборка в минимальной (упрощенной) конфигурации состоит из металлической теплораспределительной пластины со стороны источника тепла, термоэлектрического генераторного модуля и охлаждающего радиатора, отводящего тепло, проходящее через модуль в окружающую среду и создающего необходимый для работы ТГМ перепад температур (рис. 9). Вся конструкция скрепляется вместе тем или иным способом, чаще всего с помощью резьбовых соединений. В одну сборку могут быть установлены несколько модулей. Энергия от нескольких сборок может складываться при соответствующем подключении. Благодаря своей простоте конструкция обладает высокой надежностью и долговечностью (срок службы может превышать 10 лет при правильной эксплуатации).

В настоящее время наиболее широкое применение нашли два типа термоэлектрических генераторов: ТЭГ, работающий от природного газа и предназначенный для промышленного применения в газо- и нефтедобывающих отраслях, и ТЭГ, работающий от горения дров и иных широкодоступных видов топлива и предназначенный для решения задач обеспечения энергией садоводов, охотников, строителей и подразделений МЧС при отсутствии штатного электричества.

В ТЭГ для газо- и нефтедобывающей промышленности применяют тепло от сжигания природного газа для его преобразования в электрическую энергию. Такие промышленные генераторы предназначены для питания аппаратуры дистанционного телеуправления, телеметрии, автоматики и систем беспроводной передачи данных. В настоящее время линейка выпускаемых компанией «Криотерм» генераторов обеспечивает возможность получения электрической мощности от 6 до 80 Вт с одного генератора.

## Термоэлектричество в быту

Идея использования термоэлектрической генерации электрической энергии интересует многих инженеров. Первым применением ТЭГ в быту можно по праву считать генератор, разработанный и освоенный в се-

рийном производстве в конце 1940-х годов. Он был предназначен для питания лампы мощностью — порядка 2 Вт) и работал от тепла керосиновой лампы. Сейчас компания «Криотерм» выпускает в промышленных масштабах широкий спектр термоэлектрических генераторных модулей, позволяющих получать электрическую мощность, достаточную для питания маломощных нагрузок в течение протапливания печи, камина или даже мангала. В таблице 2 приведен ряд современных бытовых применений ТЭГ.

Таблица 2. Применение термоэлектричества в быту

| Бытовой прибор                           | Дополнительные возможности  |
|--|---|
| Печи для отапливания помещений           | Освещение помещения безопасным напряжением 12 В; зарядка аккумуляторов бытовых приборов; обеспечение ускоренной циркуляции воздуха за счет применения вентиляторов; питание ЖК-телевизора и другой радиоаппаратуры; зарядка аккумулятора для использования энергии после окончания протопки |
| Камины                                   | Независимое питание вентиляторов для циркуляции горячего воздуха по дому; питание автономной подсветки  |
| Печи для саун                            | Питание вентиляторов для циркуляции горячего воздуха; питание освещения и маломощных приборов безопасным напряжением 12 В; зарядка аккумулятора для питания устройств после протопки  |
| Мангалы, жаровни, барбекю                | Питание подсветки; питание системы регулирования температуры жарки; питание моторчика вращения шампура  |
| Душевые кабины                           | Питание автономной подсветки; питание встроенного радиоприемника  |
| Отопительные котлы                       | Питание циркуляционного насоса; питание маломощных бытовых устройств  |
| Солнечные концентраторы тепловой энергии | Получение электрической энергии для питания систем телеметрии, автоматики, циркуляции теплоносителя и др.   |

Одним из наиболее ярких примеров применения термоэлектрических генераторов в бытовой технике являются нашедшие в настоящее время широкое распространение термоэлектрические генераторы ТЭГ В25-12 компании «Криотерм», вырабатывающие 25 Вт электрической мощности при обеспечении температуры на нагреваемой поверхности от 300 до 400 °С. Генератор надежен и неприхотлив в эксплуатации. Два генератора, установленные на небольшую отопительную дровяную печь, обеспечивают зарядку встроенного аккумулятора при совместной работе со встроенным контроллером заряда и выдают суммарно 50 Вт электрической энергии в период горения дров.

### Измерение тепловых потоков (тепломеры)

Термоэлектрические модули широко используются в качестве измерителей плотности теплового потока, для измерения и контроля тепловых режимов двигателей, различных приборов и механизмов, для определения тепловых потерь, коэффициента теплопроводности, для получения информации о характере тепловыделений биологических объектов, для дозиметрии, контроля и автоматизации технологических процес-

сов. Принцип действия термоэлектрического модуля в качестве тепломера основан на широко известном методе вспомогательной стенки: на пути регистрируемого теплового потока располагается «стенка» — образец с известным значением коэффициента теплопроводности. В термоэлектрическом модуле роль стенки исполняют ветви полупроводникового вещества. При этом уникальное преимущество термоэлектрического модуля заключается в том, что не требуется никаких дополнительных средств для измерения перепада температур: он определяется непосредственно по напряжению, генерируемому термоэлектрическим модулем. Режим работы ТЭМ в качестве тепломера — это частный случай режима генерации (при бесконечном сопротивлении нагрузки).

### Применение ТГМ для питания маломощных устройств при малых тепловых потоках (Energy Harvesting)

Гигантский прогресс в области технологии разработки и производства маломощных электронных автономных устройств в значительной степени расширил возможности их применения. На основе ТГМ можно создавать беспроводные решения различного назначения: от простейших автономных датчиков разных физических величин до сложных систем кондиционирования воздуха, управления ресурсами или промышленной автоматизации.

Снижение мощности потребления и появление высокоэффективных преобразователей напряжения, начинающих работать при уровне 30 мВ, определили появление на рынке нового решения для питания маломощных устройств. Оно работает за счет преобразования побочных видов энергии в электрическую энергию, в частности за счет термоэлектрического преобразования потоков тепловой энергии, незначительных по величине, в том числе, в некоторых случаях, с переменной по направлению (знаку). Это позволяет повысить срок службы и надежность широкого спектра автономных устройств, требующих регулярной замены батарей питания (процесса дорогостоящего, а во многих случаях затруднительного и нежелательного с точки зрения непрерывности эксплуатации оборудования). Решения Energy Harvesting зачастую позволяют полностью отказаться от батарей питания, заменив их на аккумуляторы или конденсаторы большой емкости, что снижает эксплуатационные издержки и повышает надежность работы системы в целом. Следует особо отметить, что ключевым отличием такого применения термоэлектрического преобразования от иных, описанных в рамках данной статьи, является отсутствие получения объема энергии, способного выполнить какую-либо заметную работу.

Решения Energy Harvesting позволяют осуществлять питание датчиков дистанционного контроля совместно с радиоканалом там, где присутствуют побочные тепловые потоки. В частности, такое решение используется для питания беспроводных датчиков, сенсоров, измерителей показаний, систем контроля параметров и систем передачи информации в труднодоступных или подвижных частях оборудования, что дает возможность осуществлять контроль состояния оборудования и планировать его техническое обслуживание. Другая перспективная область — применение в системах управления отопления помещений внутри дома и снятия показаний с различных счетчиков учета расходовемых ресурсов («умный дом», беспроводные технологии для ЖКХ и др.).

Далее будут приведены результаты испытаний генераторных модулей на малых перепадах температуры.

В заключение для оценки масштаба сегодняшнего состояния термоэлектрической генерации электроэнергии приведем мощность ежегодно вводимых в эксплуатацию ТЭГ, построенных на основе продукции компании «Криотерм»: она превышает 100 кВт и растет год от года.

### Основные формулы и соотношения для определения параметров ТЭГ

Для того чтобы создать разность температур на сторонах генераторного модуля, к его горячей стороне необходимо подвести тепловой поток  $Q_h$ , а с холодной стороны отвести тепловой поток  $Q_c$ , причем их разность, по закону сохранения энергии, составит вырабатываемую электрическую мощность  $P$ :

$$P = Q_h - Q_c \quad (2)$$

На внешней нагрузке  $R_n$  ТЭГ создает напряжение  $U$ , равное термоЭДС, за вычетом падения напряжения на внутреннем сопротивлении генератора:

$$U = E_{\text{тэдс}} - I \times R, \quad (3)$$

или  $I \times R_n = E_{\text{тэдс}} - I \times R.$

Сила тока  $I$  в цепи определяется выражением:

$$I = \frac{2N \times \alpha \times \Delta T}{R + R_n} = \frac{2N \times \alpha \times \Delta T}{R(1+m)}, \quad (4)$$

где  $m = R_n/R$ . (5)

Напряжение на нагрузке равно:

$$U = I \times R_n = 2N \times \alpha \times \Delta T \frac{m}{1+m}. \quad (6)$$

Мощность, отдаваемая во внешнюю цепь, можно вычислить по следующей формуле:

$$P = I \times U = \frac{(2N \times \alpha)^2 \times \Delta T^2}{R} \times \frac{m}{(1+m)^2}. \quad (7)$$

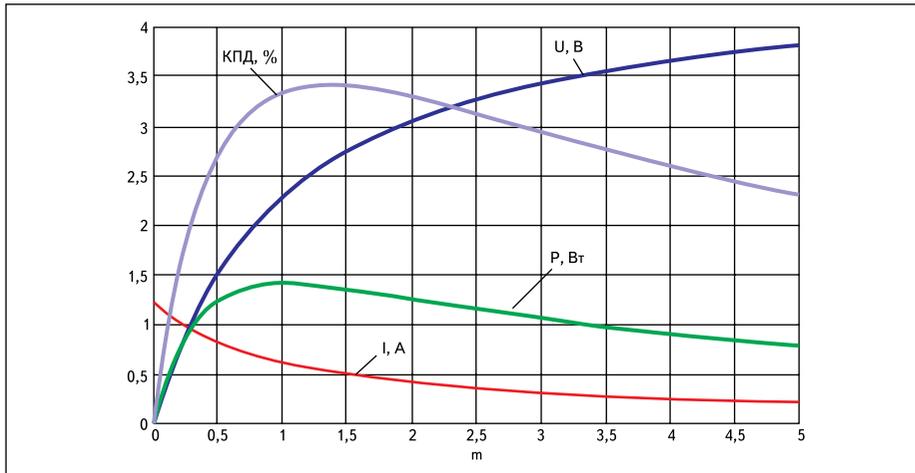


Рис. 7. Пример зависимости характеристик ТГМ от сопротивления нагрузки

Эффективность работы термоэлектрического генератора оценивается коэффициентом полезного действия:

$$\eta = P/Q_H \tag{8}$$

Для обеспечения эффективной работы ТГМ необходимо обеспечить максимально допустимую разность температур между сторонами модуля, для этого к одной его стороне надо подвести тепло ( $Q_H$ ), а с другой — обеспечить эффективный отвод тепловой энергии ( $Q_C$ ). Электрическая мощность на нагрузке прямо пропорциональна квадрату разности температур  $\Delta T$ :

$$P = Q_H - Q_C = I^2 \times R_H \sim \Delta T^2 \tag{9}$$

Для достижения максимальной мощности значение электрического сопротивления нагрузки должно быть равно значению внутреннего сопротивления генераторного модуля в условиях эксплуатации.

Выбирая определенным образом параметр  $m$ , можно изменять КПД, при этом будет изменяться электрическая мощность, которую можно получить от термоэлектрического генератора (рис. 7). Максимальную мощность с ТЭГ можно получить при равенстве внешней и внутренней нагрузок ( $m = 1$ ), а максимальный КПД достигается при  $m \approx 1,3-1,4$ .

Более подробно о расчете теплофизических и электрических параметров термоэлектрического генератора читатель может ознакомиться в [4].

### Основные параметры ТГМ

В таблице 3 приведены основные параметры генераторных модулей, нашедших наибольшее применение в настоящее время. Параметры приведены для максимально допустимой рабочей температуры горячей стороны 200 °С и температуры холодной стороны 100 °С — температуры кипения воды, часто применяемой для стабилизации

температуры холодного спая. При технической возможности обеспечения охлаждения холодной стороны модуля до более низкой температуры значения снимаемых с модуля тока и напряжения будут возрастать в линейной, а мощность — в квадратичной пропорции.

Пояснения к таблице 3:

1. Приведенные параметры ТГМ включают в себя потери при прохождении теплового потока через керамические пластины модуля и на слое силиконового теплопроводящего масла толщиной 30 мкм по горячей стороне модуля. Для упрощения процесса конструирования и расчета параметры ТГМ приведены для температур на керамических поверхностях модуля.
2. При проведении более точного расчета термоэлектрического генератора следует

иметь в виду, что на керамике, используемой в стандартных модулях ( $Al_2O_3$ ), перепад температур может составлять до 10 К.

3. В процессе увеличения тока на нагрузке разность температур между горячей и холодной сторонами модуля может возрасти до 5% от текущего значения вследствие проявления эффекта Пельтье. Это имеет особое значение при работах вблизи максимально допустимых температур эксплуатации, так как может привести к перегреву горячей стороны и выходу модуля из строя.

### Варианты исполнения ТГМ

В зависимости от условий применения (количества модулей в одном генераторе, конструкции радиатора, схемы соединения и др.) и для наиболее эффективного и надежного применения модулей в конкретных приложениях компания «Криотерм» выпускает ТГМ с различными опциями, расширяющими возможности применения ТГМ по отношению к стандартному. Стандартный и дополнительные варианты приведены в таблице 4.

### Система обозначения термогенераторных модулей

Для обозначения термоэлектрических генераторных модулей используется универсальное сокращение типа ТГМ-N-C-h ВВ, где:

- ТГМ — сокращенное наименование изделия;
- N — количество термоэлектрических пар в модуле;
- C — линейный размер (в мм) сечения ТЭЭ;
- h — высота ТЭЭ (в мм).

Таблица 3. Основные параметры генераторных модулей

| Наименование                           | Геометрические размеры, мм |    |     | R, Ом | R (22 °С), Ом | Rt, К/Вт | U, В | I, А | P, Вт | $\eta$ , % |
|--|----------------------------|----|-----|-------|---------------|----------|------|------|-------|------------|
|  | A                          | B  | H   |       |               |          |      |      |       |            |
| Тхол.спая = 50 °С, Тгор.спая = 150 °С  |                            |    |     |       |               |          |      |      |       |            |
| ТГМ-127-1,0-0,8                        | 30                         | 30 | 3,1 | 2,41  | 1,18          | 1,4      | 1,83 | 0,76 | 1,38  | 2,3        |
| ТГМ-127-1,0-1,3                        | 30                         | 30 | 3,6 | 3,92  | 1,92          | 2,27     | 2,18 | 0,56 | 1,21  | 2,7        |
| ТГМ-127-1,0-2,5                        | 30                         | 30 | 4,3 | 7,53  | 3,69          | 4,36     | 2,55 | 0,34 | 0,86  | 3,2        |
| ТГМ-127-1,4-1,5                        | 40                         | 40 | 3,9 | 2,46  | 1,21          | 1,43     | 2,25 | 0,91 | 2,05  | 2,8        |
| ТГМ-127-1,4-2,5                        | 40                         | 40 | 4,8 | 3,84  | 1,88          | 2,23     | 2,5  | 0,65 | 1,63  | 3,2        |
| ТГМ-199-1,4-0,8                        | 40                         | 40 | 3,2 | 1,93  | 0,94          | 0,45     | 2,19 | 1,14 | 2,49  | 1,8        |
| ТГМ-199-1,4-1,2                        | 40                         | 40 | 3,6 | 2,89  | 1,42          | 0,68     | 2,69 | 0,93 | 2,5   | 2,2        |
| ТГМ-199-1,4-1,5                        | 40                         | 40 | 3,9 | 3,85  | 1,89          | 0,91     | 3,03 | 0,79 | 2,39  | 2,4        |
| ТГМ-287-1,0-1,3                        | 40                         | 40 | 3,6 | 8,85  | 3,84          | 1,00     | 4,54 | 0,51 | 2,33  | 2,5        |
| ТГМ-287-1,0-1,5                        | 40                         | 40 | 3,8 | 10,2  | 4,72          | 1,16     | 4,77 | 0,47 | 2,23  | 2,7        |
| ТГМ-287-1,0-2,5                        | 40                         | 40 | 4,8 | 17    | 7,38          | 1,93     | 5,49 | 0,32 | 1,77  | 3,1        |
| Тхол.спая = 100 °С, Тгор.спая = 200 °С |                            |    |     |       |               |          |      |      |       |            |
| ТГМ-127-1,0-0,8                        | 30                         | 30 | 3,1 | 2,51  | 1,18          | 1,36     | 1,73 | 0,69 | 1,19  | 2          |
| ТГМ-127-1,0-1,3                        | 30                         | 30 | 3,6 | 4,07  | 1,92          | 2,21     | 2,07 | 0,51 | 1,05  | 2,4        |
| ТГМ-127-1,0-2,5                        | 30                         | 30 | 4,3 | 7,84  | 3,69          | 4,26     | 2,43 | 0,31 | 0,75  | 2,8        |
| ТГМ-127-1,4-1,5                        | 40                         | 40 | 3,9 | 2,56  | 1,21          | 1,39     | 2,13 | 0,83 | 1,78  | 2,4        |
| ТГМ-127-1,4-2,5                        | 40                         | 40 | 4,8 | 4     | 1,88          | 2,17     | 2,38 | 0,6  | 1,42  | 2,7        |
| ТГМ-199-1,4-0,8                        | 40                         | 40 | 3,2 | 2     | 0,94          | 0,44     | 2,07 | 1,03 | 2,14  | 1,5        |
| ТГМ-199-1,4-1,2                        | 40                         | 40 | 3,6 | 3,01  | 1,42          | 0,67     | 2,55 | 0,85 | 2,16  | 1,9        |
| ТГМ-199-1,4-1,5                        | 40                         | 40 | 3,9 | 4,01  | 1,89          | 0,89     | 2,88 | 0,72 | 2,06  | 2,1        |
| ТГМ-287-1,0-1,3                        | 40                         | 40 | 3,6 | 9,21  | 3,84          | 0,98     | 4,3  | 0,47 | 2,01  | 2,2        |
| ТГМ-287-1,0-1,5                        | 40                         | 40 | 3,8 | 10,6  | 4,72          | 1,13     | 4,52 | 0,43 | 1,93  | 2,3        |
| ТГМ-287-1,0-2,5                        | 40                         | 40 | 4,8 | 17,7  | 7,38          | 1,88     | 5,22 | 0,29 | 1,54  | 2,6        |
| Тхол.спая = 50 °С, Тгор.спая = 300 °С  |                            |    |     |       |               |          |      |      |       |            |
| ТГМ-31-2,8-3,5 НТ(300)                 | 40                         | 40 | 6,5 | 0,3   | 0,15          | 0,26     | 1,15 | 3,80 | 4,37  | 5,3        |

Таблица 4. ТГМ с различными опциями

| Наименование  | Обозначение                 | Примечание  |
|---|-----------------------------|---|
| Точность обработки установочных поверхностей модуля   |                             |   |
| Плоскостность 0,02 мм<br>Параллелизм 0,03 мм  | L1                          | Базовый вариант поставки<br>Разброс высот $\pm 0,05$ мм |
| Плоскостность 0,015 мм<br>Параллелизм 0,02 мм   | L2                          | Разброс высот $\pm 0,025$ мм                            |
| Плоскостность 0,01 мм<br>Параллелизм 0,01 мм  | L3                          | Разброс высот $\pm 0,015$ мм                            |
| Другие стандартные варианты и дополнительные опции  |                             |   |
| Максимальное отклонение значения Рас при поставке (базовый вариант)                           | —                           | $\pm 10\%$  |
| Максимальное отклонение длины (размер А) и ширины (размер В)                                  | —                           | $+0,5/-0,2$ мм  |
| Металлизация холодной (мс), горячей (mh) или холодной и горячей (mm) сторон модуля с лужением | mc95<br>mh95, mm117 и т. д. | Температура плавления припоя 95, 117, 139, 183 °С       |
| Металлизация с никелевым покрытием  | mcNi, mhNi, mmNi            | —   |
| Металлизация с золотым покрытием  | mcAu, mhAu, mmAu            | —   |
| Тип и длина провода, изготовление цепочек   | —                           | По спецификации заказчика                               |
| Датчик температуры спаев по горячей и/или холодной сторонам                                   | —                           | —   |

Пример записи наименования термоэлектрического генераторного модуля:

«Термоэлектрический генераторный модуль ТГМ-127-1,0-2,5-L3»,

где первое число означает количество термопар в модуле, второе число — линейный размер сечения ТЭЭ (1 мм), третье — высоту ТЭЭ (2,5 мм). Рабочие керамические поверхности модуля имеют плоскостность не хуже, чем 0,1 мм, и параллелизм не хуже 0,01 мм. Высота модуля лежит в пределах  $\pm 0,015$  мм от заданного спецификацией значения.

### Результаты испытаний на малых перепадах температур

Как правило, производители ТГМ приводят расчетные параметры модулей для максимальной разности температур. При разработке современных решений часто бывает важно знать, как будет вести себя модуль при малых перепадах температур. Ниже приведены результаты испытаний двух образцов ТГМ в таком режиме. Как это видно из результатов испытаний, приведенных на рис. 8, генераторный модуль ТГМ-199-1,4-1,5 обеспечивает выходное напряжение порядка 400 мВ и выходную мощность порядка 45 мВт при наличии минимальной разности температур 10 °С. График показывает, что необходимое для устойчивой работы современных микросхем для Energy Harvesting решений напряжение 30 мВ будет обеспечено при разности температур на сторонах модуля 2...3 °С.

Испытания проводились при изменении температуры горячей стороны от 35 до 50 °С с шагом 5 °С при фиксированном значении температуры холодной стороны модуля 25 °С. Следует ожидать получения большего значения выходного напряжения в случае применения генераторных модулей серии ТГМ-287, имеющих большее число термопар и, как следствие, пропорционально большее значение термоЭДС.

Как уже было сказано, значения снимаемых с модуля тока и напряжения с увеличением

разности температур возрастают в линейной, а мощность — в квадратичной пропорции. На приведенных графиках разность в поведении напряжения и мощности неочевидна, поскольку в начале отсчета кривизна квадратичной функции невысока и нивелируется погрешностями замеров. Это хорошо видно на рис. 9, где представлены графические характеристики того же модуля в широком интервале температур.

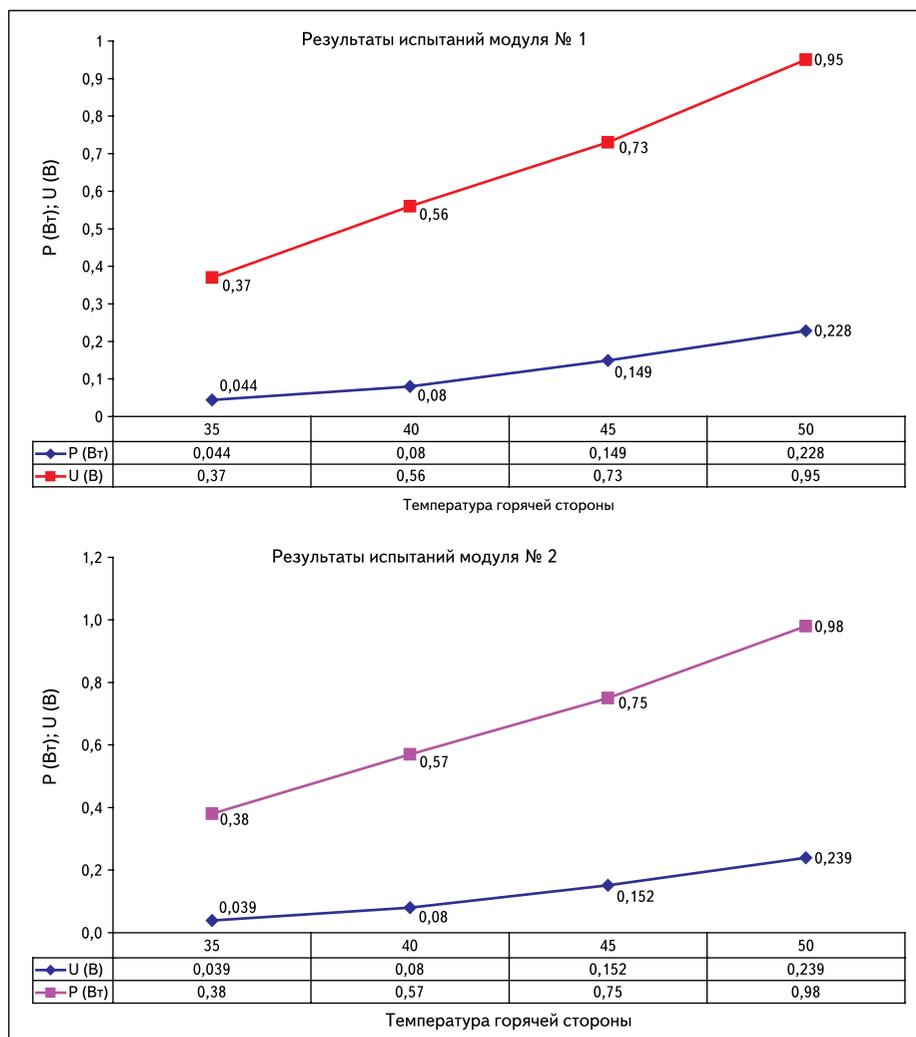


Рис. 8. Результаты испытаний генераторных модулей на малых перепадах температуры при  $T_c = 25$  °С

### Рекомендации по применению ТГМ

Для получения наибольшей эффективности и надежности работы ТГМ необходимо руководствоваться следующими ключевыми принципами:

1. Горячая и холодная поверхности, на которые будет установлен модуль, должны иметь высокую плоскостность: не хуже 20 мкм в базовом варианте. При этом для получения наилучшей эффективности, особенно в случае применения модулей с улучшенной плоскостностью и параллелизмом (L2 и L3), рекомендуемое значение плоскостности — от 10 до 5 мкм.
2. Генераторный модуль должен быть соответствующим образом установлен между источником тепла и холодным радиатором. Для достижения наилучшего результата и сохранения работоспособности генераторного модуля в течение срока эксплуатации необходимо обеспечить усилие сжатия порядка 1–1,5 кН для модуля размером 40×40 мм. Для оптимизации нагрузки в период эксплуатации целесообразно использовать пружины совместно с резьбовыми соединениями (будет подробно рассмотрено ниже).

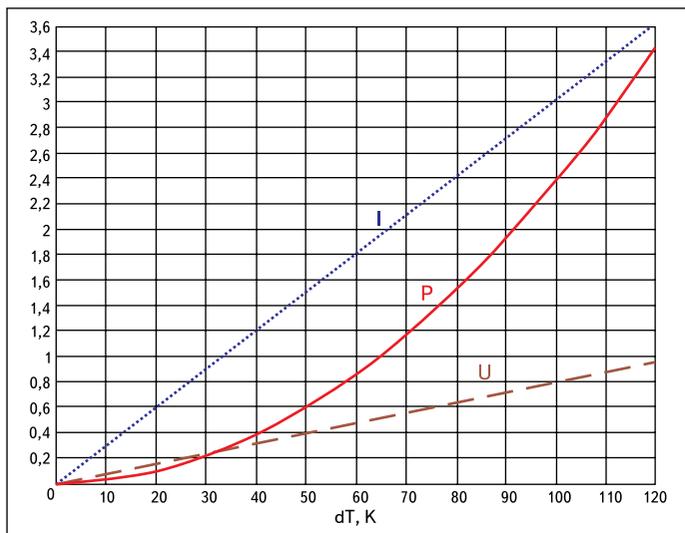


Рис. 9. График зависимости тока I (А), напряжения U (В) и мощности P (Вт) от разности температур между горячей и холодной сторонами генераторного модуля

- Температура горячей стороны ТГМ не должна превышать заданную в спецификации.
- Край металлической поверхности источника тепла, соприкасающейся с ТГМ, должен выходить за границы модуля, желательно на 10 мм и более с каждой стороны.
- Температура поверхности модуля должна быть максимально равномерной. В случае если источник тепла и/или радиатор холодной стороны изготовлены не из меди, рекомендуется применять промежуточные медные пластины для предотвращения неравномерного температурного поля.
- Для увеличения потока тепла, проходящего через модуль, диаметр стягивающих болтов конструкции ТЭГ должен быть по возможности минимальным. Материал болтов желательно выбирать с минимальной теплопроводностью (например, нержавеющая сталь).
- Для обеспечения наилучшего теплового контакта ТГМ с источником тепла и радиатором холодной стороны необходимо применять теплопроводную пасту. Слой термопасты должен быть по возможности минимальным для сохранения прямого контакта между керамической поверхностью модуля и металлом (рис. 10).

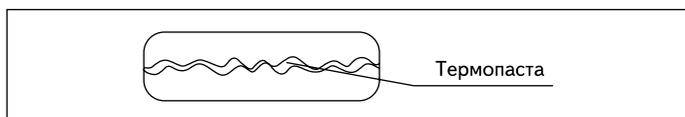


Рис. 10. Прямой механический контакт керамики с металлом и через термопасту

- Для получения максимальной генерируемой мощности конкретный тип модуля должен быть выбран с учетом характеристик элементов конструкции ТЭГ, радиатора, интерфейсных материалов и др. Важной характеристикой модуля является его тепловое сопротивление (табл. 3), выбирать которое следует исходя из следующего соотношения:

$$R_t \sim k \times (R_c + R_h),$$

где  $k$  — численный коэффициент, равный 1–1,5.

### Установка генераторных модулей

Существует два наиболее распространенных способа установки модуля в конструкцию ТЭГ: с помощью болтового прижима и с помощью пайки. Второй вариант установки модулей, как правило, применяется для маломощных ТЭГ, работающих на небольших

перепадах температур со средней эффективностью преобразования. Механическая прочность таких конструкций невысока из-за относительной массивности радиатора. Модули для этого варианта применения поставляются с нанесенной на рабочие поверхности металлизацией.

Наибольшее распространение получил простой способ установки ТГМ с помощью резьбовых стягивающих болтов (шпилек). При этом поставщики ТГМ дают рекомендации по усилию, необходимому для обеспечения эффективной работы генератора и его долговечности. Однако на деле в процессе эксплуатации в силу различных значений коэффициента теплового расширения элементов конструкции термоэлектрического генератора модули могут быть подвергнуты или избыточному сжатию, превышающему рекомендованное производителем значение, или ослабеванию сжимающего усилия. В первом случае это приводит к механическому выходу модуля из строя, а во втором — к резкому снижению эффективности термоэлектрического преобразования.

Необходимость обеспечения прижимного усилия, с одной стороны, и необходимость работы с максимально допустимым для модуля перепадом температур между горячей и холодной сторонами, с другой, заставляют искать решения, позволяющие компенсировать тепловое расширение и обеспечить равномерное усилие сжатия модуля в широком интервале температур. Одним из наиболее перспективных способов установки ТГМ, повышающим долговечность и эффективность ТЭГ, является применение стандартной конструкции с резьбовым соединением, компенсирующим тепловое расширение пружин, которые обеспечивают равномерность сжатия в диапазоне рабочих температур до 300 °С с усилием от 1 до 1,5 кН (для модуля размером 40×40 мм).

На рис. 11–13 приведены три варианта установки ТГМ с помощью компенсирующих пружин (сила сжатия приведена для модуля размером 40×40 мм).

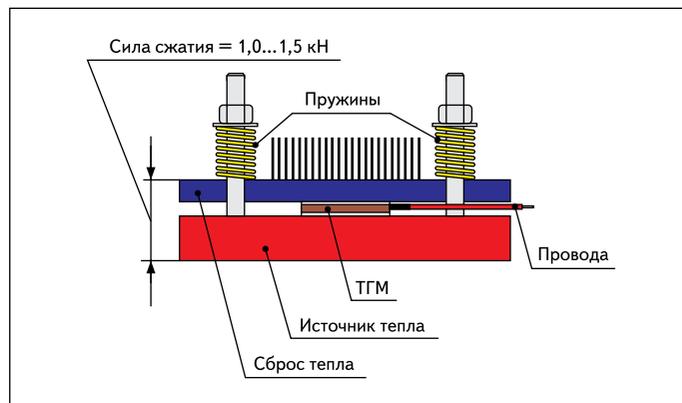


Рис. 11. Установка модуля с применением спиральных пружин

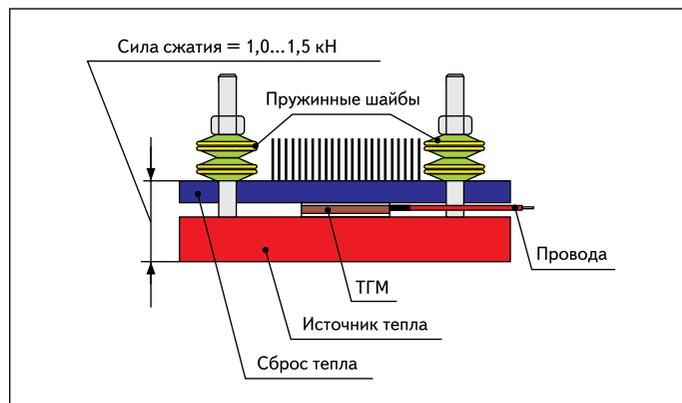


Рис. 12. Установка модуля с применением дисковых (тарелочных) пружин Бельвиля

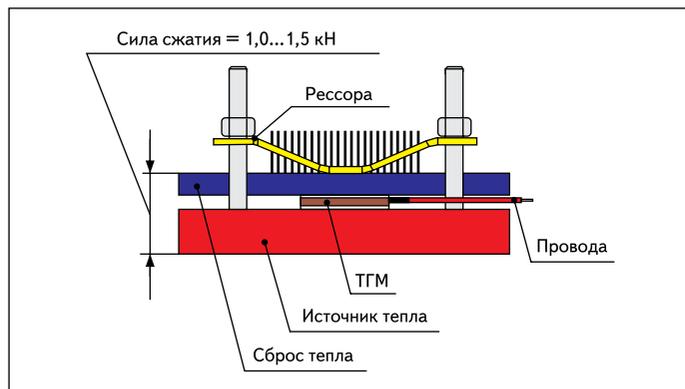


Рис. 13. Установка модуля с применением рессорных прижимных пружин

### Термомагнетизм Земли Томаса Зеебека в современном представлении (в качестве заключения)

Итак, история термоэлектричества, начиная с публикации в 1822 г. научного труда Томаса Зеебека «К вопросу о магнитной поляризации некоторых материалов и руд, возникающей в условиях разности температур», была связана с понятием земного магнетизма. Из своего опыта Зеебек сделал вывод, что «разность температур в местах соприкосновения металлической цепи является источником освобождающегося магнетизма, причиной магнитных действий». Зеебек назвал этот эффект термомагнетизмом. Он считал, что это явление как нельзя лучше объясняет возникновение земного магнетизма: магнитные свойства Земли он связывал с действием разницы температур между полюсами и экватором в разных участках земной коры. С одной стороны, материал, приведенный выше, опровергает термомагнетизм, с другой — существует целый ряд публикаций, указывающих на большую вероятность значительного влияния на земной магнетизм и процессы, происходящие вблизи поверхности Земли, протекающих термоэлектрических процессов.

Действительно, породы, из которых состоит земная кора, за счет содержания различных примесей обладают свойствами, близкими к свойствам полупроводников как  $p$ -, так и  $n$ -типа. Наличие разности температур в земной коре в сотни и тысячи градусов приводит к образованию электрических зарядов. В связи с различными свойствами пород (в том числе электрическими) в различных областях залегания

заряды распределяются по земной поверхности неравномерно, при этом энергия, выделяемая при их пересечении магнитного поля Земли, сопоставима с энергией, высвобождающейся при сейсмических явлениях. Механические напряжения, возникающие в земной коре за счет самого электрического поля и силы Лоренца, появляющейся при пересечении магнитного поля Земли, могут стать катализатором тектонических процессов, а изменение свойств земной породы, магнитного поля и температуры поверхности — признаком надвигающихся катастроф. Возможность практического применения накапливаемых термоэлектрических зарядов изучают многие ученые, работающие над созданием источников возобновляемой энергии.

### Литература

1. Иоффе А. Ф., Стыльбанс Л. С., Иорданишвили Е. К., Ставицкая Т. С. Термоэлектрическое охлаждение. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1956.
2. Бурштейн А. И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств. М.: Физматгиз, 1962.
3. Голдсмит Г. Применения термоэлектричества / Пер. с англ. под ред. А. Ф. Чудновского. М.: Физматгиз, 1963.
4. Кораблев В. А., Тахистов Ф. Ю., Шарков А. В. Прикладная физика. Термоэлектрические модули и устройства на их основе: Учебное пособие / Под ред. проф. А. В. Шаркова. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003.
5. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. М.-Л., Изд-во АН СССР, 1956–1960.
6. Охотин А. С., Ефремов А. А., Охотин В. С., Пушкарский А. С. Термоэлектрические генераторы. М.: Атомиздат, 1971.
7. Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания. М.: Советское радио, 1968.
8. Баукин В. Е., Вялов А. П., Гершберг И. А., Муранов Г. К., Соколов О. Г., Тахистов Ф. Ю. Оптимизация термоэлектрических генераторов большой мощности // Термоэлектрики и их применения. Доклады VIII Межгосударственного семинара (ноябрь 2002 г.). СПб: ФТИ, 2002.
9. Тахистов Ф. Ю., Гершберг И. А. Оптимизация параметров термоэлектрического генераторного модуля с учетом эффективности теплообмена на сторонах модуля // Термоэлектрики и их применения. Доклады XI Межгосударственного семинара (ноябрь 2008 г.). СПб: ФТИ, 2008.
10. Ерофеев Р. С. Влияние термоэлектрических явлений на тектонические процессы и климат Земли // Термоэлектричество. 2010. № 1.
11. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники // Компоненты и технологии. 2009. № 12. 2010. № 1.