

# Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники

Петр ШОСТАКОВСКИЙ  
info@kryotherm.ru

Термоэлектрические явления известны человечеству без малого два столетия, однако их использование значительно отстает от широких возможностей их практического применения и может быть заметно расширено в самые разные сферы нашей деятельности. Наиболее ярко это наблюдается в России, где были разработаны и изготовлены первые высокоэффективные термоэлектрические устройства с применением полупроводников. Цель статьи — привлечь внимание разработчиков к широким возможностям термоэлектрических явлений, таких как термоэлектрическое охлаждение и генерация электрической энергии, уже нашедшим широкое применение за рубежом. Статья разделена на две части, в первой из которых кратко освещена история изучения термоэлектричества, описаны физические процессы в термоэлектрических модулях (ТЭМ) и дано представление о видах термоэлектрической продукции и условных обозначениях термоэлектрических модулей. Во второй части статьи описаны особенности и примеры применения термоэлектрических модулей.

## Введение

Многолетний успешный опыт взаимодействия компании «КРИОТЕРМ» со многими высокотехнологичными предприятиями Европы, Северной Америки и Азии позволяет предложить российским разработчикам современные термоэлектрические методы охлаждения, стабилизации температуры и прямого преобразования тепловой энергии в электрическую для самых актуальных потребностей рынка высоких технологий. Предприятие было основано в 1992 г. на базе филиала «Всесоюзного Научно-исследовательского Института Источников Тока», специализировавшегося на разработке и выпуске небольших партий термоэлектрических систем для нужд военной и аэрокосмической отраслей. Основным направлением деятельности ученых было создание источников электрической энергии на основе термоэлектрического эффекта для обеспечения работоспособности космических аппаратов, работающих на удаленных от Солнца орбитах и потому не имевших возможности использовать энергию солнечных батарей. В качестве источника энергии применялось ионизирующее излучение изотопов с длительным периодом полураспада. Большой опыт разработки и производства высоконадежных и высокоэффективных термоэлект-

рических систем послужил отличной базой для создания и развития компании.

В течение последних лет, благодаря высокому научному потенциалу, высокопроизводительному современному оборудованию и современной системе управления предприятием, компания завоевала лидирующие позиции на мировом рынке разработчиков и производителей термоэлектрических модулей.

Сегодня «КРИОТЕРМ» является крупнейшим в России и одним из ведущих мировых разработчиков и производителей высококачественных термоэлектрических модулей и систем на их основе. Отличительной особенностью компании является наличие полного цикла разработки и изготовления термоэлектрической продукции с собственным производством полупроводникового вещества для ТЭМ, высокотехнологичным оборудованием сборочного производства и специализированным испытательным оборудованием.

Компания имеет в своей номенклатуре более 250 типов продукции с различной степенью технологической завершенности (от высокоэффективного полупроводникового вещества и термоэлектрических элементов до термоэлектрических модулей, сборок и устройств на их основе). Это обеспечивает высокую устойчивость позиций компании на рынке термоэлектрических устройств,

позволяет обеспечивать заказчиков как универсальными, так и специализированными решениями.

Система менеджмента качества компании соответствует стандартам ИСО 9001-2000.

## Немного истории

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

Одной из фундаментальных работ в этой области, фактически положившей начало термоэлектрическим исследованиям, явилась статья немецкого ученого Томаса Иоганна Зеебека (рис. 1) «К вопросу о магнитной поляризации некоторых материалов и руд, возникающих в условиях разности температур», опубликованная в докладах Прусской академии наук в 1822 г.

Суть явления, наблюдавшегося Зеебеком в процессе опыта (и вошедшего впоследствии в физику под термином «эффект Зеебека»), состояла в том, что при замыкании концов цепи, состоящей из двух разнородных металлических материалов, спаи которых находились при разных температурах, магнитная стрелка, помещенная вблизи такой цепи,



Рис. 1. Томас Иоганн Зеебек

поворачивалась так же, как в присутствии магнитного материала. Угол поворота был связан с величиной разности температур на спаях исследуемой цепи.

В 1834г., то есть спустя 12 лет после открытия Зеебека, во французском журнале "Annales de physique et de chimie" была опубликована статья швейцарского часовщика и большого любителя-экспериментатора Шарля Анри Пельтье (рис. 2) о температурных эффектах вблизи спаев цепи из различных проводников при пропускании через них постоянного электрического тока.



Рис. 2. Шарль Анри Пельтье

Третье термоэлектрическое явление — «эффект Томсона» — в 1856г. было обнаружено Уильямом Томсоном, впоследствии получившим титул лорда Кельвина, (рис. 3).

Сутью открытого Томсоном эффекта является выделение или поглощение тепловой энергии в объеме материала при наличии в нем градиента температур и пропускании через него электрического тока. Величина выделяемой или поглощаемой энергии пропорциональна величине термо-ЭДС материала. С физической точки зрения эффект Томсона является внутренним эффектом Пельтье, возникающим на границе участков цепи с различными значениями термо-ЭДС.

В один ряд с первооткрывателями термоэлектрических явлений необходимо поставить и выдающегося советского ученого-физика, академика Абрама Федоровича Иоффе (рис. 4).

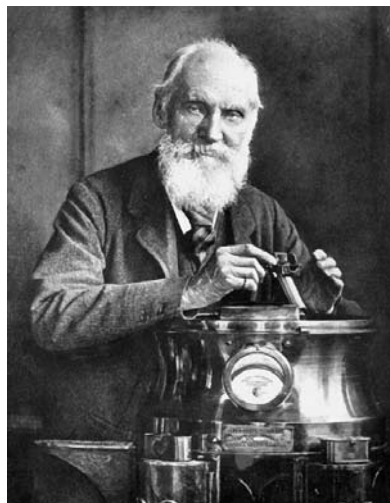


Рис. 3. Уильям Томсон (лорд Кельвин)



Рис. 4. Абрам Федорович Иоффе

Благодаря работам А. Ф. Иоффе, которые он проводил с начала 30-х годов XX столетия, была заложена основа развития современной термоэлектрической энергетики.

Для наиболее полного понимания возможностей и особенностей применения ТЭМ рассмотрим основополагающие термоэлектрические эффекты. Как уже было упомянуто выше, это эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона. Каждое из этих явлений обусловлено взаимосвязью тепловых и электрических процессов в металлах или полупроводниках. Причина всех термоэлектрических явлений — нарушение теплового равновесия в потоке электронов.

#### Эффект Зеебека

Эффект Зеебека — термоэлектрический эффект, заключающийся в возникновении термо-ЭДС при нагреве контакта (спая) двух

разнородных металлов или полупроводников. Напряжение термо-ЭДС  $E_{мэдс}$  прямо пропорционально коэффициенту Зеебека  $E$  и разнице температур  $\Delta T$  между горячей  $T_h$  и холодной  $T_c$  сторонами (спаями) термоэлектрического модуля (рис. 5):

$$E_{мэдс} = E \times \Delta T.$$

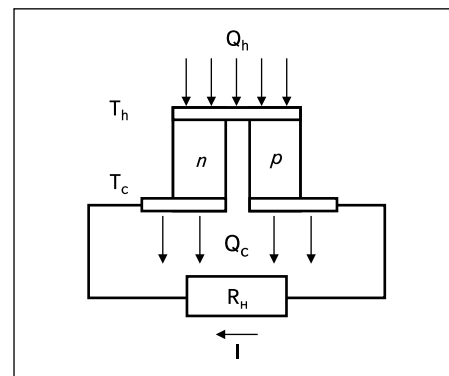


Рис. 5. Структурная схема ТЭМ

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

$$P = Q_h - Q_c$$

Эффект Зеебека широко известен и используется, например, при измерении температур термопарами. На эффекте Зеебека основано действие термоэлектрических генераторов.

#### Эффект Пельтье

Эффект Пельтье — термоэлектрическое явление, заключающееся в том, что при пропускании электрического тока  $I$  через контакт (спай) двух различных веществ (проводников или полупроводников) на контакте, помимо джоулева тепла, происходит выделение дополнительного тепла Пельтье  $Q_p$  (при одном направлении тока) и его поглощение (при обратном направлении).

Причина возникновения явления Пельтье заключается в следующем. На контакте двух веществ имеется контактная разность потенциалов, которая создает внутреннее контактное поле. Если через контакт идет ток, то это поле будет способствовать прохождению тока либо ему препятствовать. Если ток идет против контактного поля, то внешний источник должен затратить дополнительную энергию, которая выделяется в контакте, что приведет к его нагреву. Если же ток идет по направлению контактного поля, то он может поддерживаться этим полем, которое и совершает работу по перемещению зарядов. Необходимая для этого энергия отбирается у вещества, что приводит к охлаждению его в месте контакта.

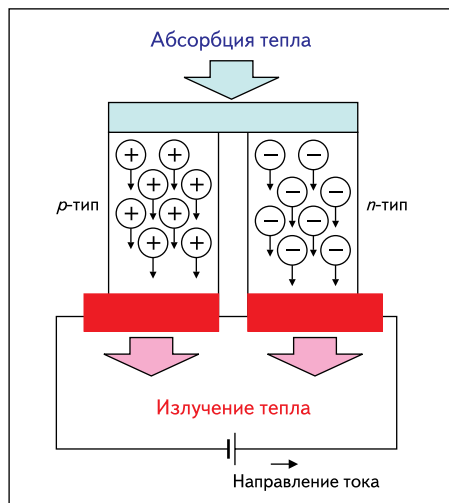


Рис. 6. Эффект Пельтье в полупроводниковых ТЭМ

В отличие от эффекта Джоуля, который будет рассмотрен ниже, эффект Пельтье (рис. 6) контактный, а значит — поверхностный, большая площадь контакта позволяет получить большую охлаждающую мощность.

Металлы и полупроводники являются материалами, в которых можно наблюдать термоэлектрические эффекты. В обоих случаях присутствует кристаллическая решетка ионов. В проводниках она состоит из положительных ионов и свободных электронов, образующих электронный газ. В полупроводниках атомы решетки теряют или приобретают электроны, при этом первые образуют полупроводники *p*-типа, а вторые *n*-типа соответственно. Для всех приведенных примеров в случае отсутствия электрического поля ионы совершают колебательные движения около положения равновесия, а электроны находятся в броуновском движении. При появлении электрического поля в проводнике или полупроводнике электронный газ сдвигается, при этом ионы в узлах решетки остаются на месте. Электроны приобретают огромную скорость, однако их движение происходит на фоне доминирующего хаотичного броуновского теплового движения.

### Эффект Томсона

Эффект Томсона заключается в переносе теплоты током, протекающим через однородный материал, в котором создан градиент температуры. Если вдоль проводника с током существует градиент температур, то в каждой единице объема проводника будет поглощаться или выделяться — в зависимости от направления тока — тепло, пропорциональное току и градиенту температуры. Эффект Томсона проявляется во всем объеме термоэлектрического вещества и является внутренней, объемной модификацией эффекта Пельтье. Количество переносимой теплоты пропорционально величине этого градиента и силе протекающего тока.

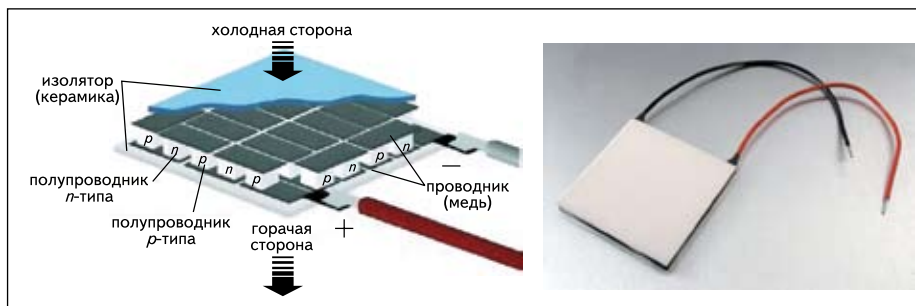


Рис. 7. Конструктивное исполнение и внешний вид ТЭМ

Уильям Томсон вывел термодинамические соотношения, позволившие ему предсказать третий термоэлектрический эффект и дать исчерпывающее объяснение эффектам Зеебека и Пельтье, а также описать взаимосвязи между ними. Вкупе все три открытия заложили основу для развития самостоятельной области техники — термоэнергетики, которая занимается как вопросами прямого преобразования тепловой энергии в электрическую (эффект Зеебека), так и вопросами термоэлектрического охлаждения и нагрева (эффект Пельтье).

Наряду с кратко описанными выше термоэлектрическими эффектами при протекании электрического тока через термоэлектрическое вещество в нем необратимо выделяется тепловая (джоулева) мощность.

### Эффект Джоуля

Эффект Джоуля — при протекании электрического тока в проводнике выделяется тепловая мощность, пропорциональная его сопротивлению и квадрату тока.

### Термоэлектрический модуль, его конструктивные и физические особенности

В современных практических приложениях используются ТЭМ — конструктивно завершенные термоэлектрические устройства (рис. 7 и 8), в которых единственным элементом ТЭМ является термопара, состоящая из двух разнородных полупроводниковых элементов с *p*- и *n*-типами проводимости. Элементы соединяются между собой при помощи коммутационных пластин из меди — как правило, последовательно. В стандартном термоэлектрическом модуле термопары помещаются между двух плоских керамических пластин на основе оксида или нитрида алюминия, при этом с точки зрения тепловых потоков все термоэлектрические элементы соединены параллельно. Количество термопар может изменяться в широких пределах — от единиц до сотен, что позволяет создавать ТЭМ практически любой холодильной мощности — от десятых долей до сотен Ватт с рабочим напряжением от долей до десятков Вольт.

Многолетняя практика сотрудничества со многими высокотехнологичными компаниями в различных областях индустрии поз-

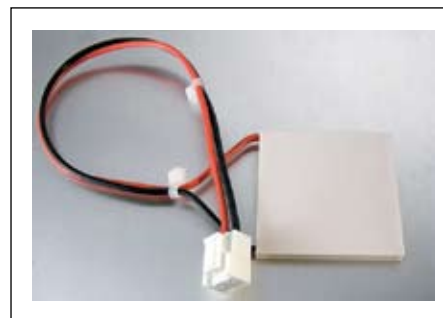


Рис. 8. ТЭМ с коннектором

волила ввести следующую классификацию модулей:

- Термоэлектрические модули (рис. 7–9), включающие более 250 наименований, среди которых стандартные типоразмеры (40×40 мм, 30×30 мм, 15×15 мм и др.), а также специально разработанные и прошедшие испытания у заказчиков (от микромодулей до модулей с габаритами 62,5×62,5 мм).
- Генераторные модули (рис. 9), предназначенные для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую.



Рис. 9. Вариант исполнения генераторных ТЭМ

Все модули выпускаются в соответствии с ТУ 6349-001-79789858-2007 «Модули термоэлектрические полупроводниковые».

### Однокаскадные и многокаскадные модули

Более подробно остановимся на широко распространенных типах выпускаемых ТЭМ, которые разделяются, в зависимости от конструктивного исполнения, на однокаскадные и многокаскадные.



**Однокаскадные модули**

Однокаскадные модули бывают следующими:

- односекционные (рис. 10);
- двухсекционные (рис. 11);
- круглой формы (рис. 12);
- с отверстием (рис. 13).

Вид конструктивного исполнения и параметры ТЭМ при заказе нередко указываются в спецификации, однако технические условия (ТУ 6349-001-79789858-2007) для подавляющего большинства случаев дают исчерпывающее обозначение ТЭМ и его конструктивного исполнения, включая дополнительные опции.

Обозначение однокаскадных модулей производится согласно СТП 200.0104-07. Для их наименования используется универсальное сокращение типа: AA-N-C-h BB, где AA — сокращенное наименование изделия (LCB — для модулей, применяемых в бытовых охлаждающих устройствах, ТВ (термоэлектрическая батарея) — для всех остальных однокаскадных модулей); N — количество термоэлектрических пар в модуле; C — линейный размер (в миллиметрах) сечения термоэлектрического элемента (ТЭЭ); h — высота ТЭЭ (в миллиметрах); BB — дополнительный индекс, который используется только для круглых модулей и модулей с отверстиями (CH — для прямоугольных модулей с центральным отверстием, CHR — для круглых модулей с центральным отверстием, R — для круглых модулей).

Разберем пример записи наименования однокаскадного модуля: «Однокаскадный модуль ТВ-127-1,4-1,5 FROST-71, ТУ 6349-001-79789858-2007». Здесь первое число означает количество термпар в модуле, второе число — линейный размер сечения ТЭЭ, третье — высоту ТЭЭ. FROST — это дополнительное индивидуальное наименование высокоэффективного (или двухсекционного) модуля, а «71» означает, что максимальная разность температур  $\Delta T$ , обеспечиваемая модулем, в данном примере составляет  $\geq 71K$ .

Для наиболее эффективного и надежного применения ТЭМ в конкретных приложениях компания «КРИОТЕРМ» выпускает ТЭМ с различными дополнительными опциями (табл. 1.):

- с различными типами металлизации рабочих поверхностей, в том числе и с золотым покрытием;
- с возможностью монтажа в стандартные и специальные корпуса микроэлектронных приборов;
- с несколькими десятками стандартных дополнительных опций (предельная рабочая температура, точность геометрических размеров, типы выводов, герметизации и т. д.).

**Многокаскадные модули**

Наибольшее распространение у наших заказчиков получили двух-, трех- и четырех-

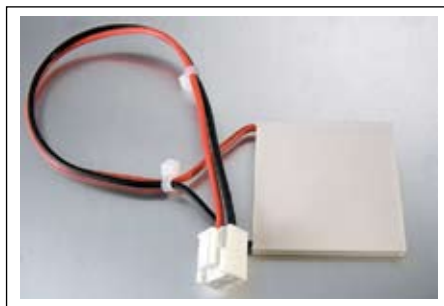


Рис. 10. Однокаскадные односекционные ТЭМ

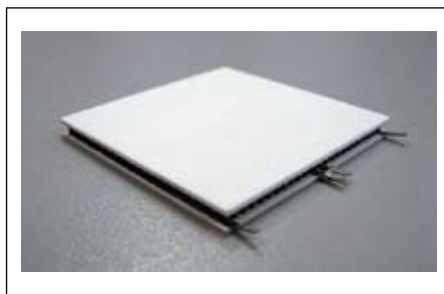


Рис. 11. Однокаскадные двухсекционные ТЭМ



Рис. 12. Однокаскадные ТЭМ круглой формы



Рис. 13. Однокаскадные ТЭМ с отверстием

каскадные модули (рис. 14 и 15) с оптимизированными для различных применений конструкциями.

Для достижения максимальной  $\Delta T$  при минимальных размерах модуля используется улучшенный термоэлектрический материал. Разность температур, обеспечиваемая многокаскадным термоэлектрическим модулем, превышает 140 К.

Для наименования многокаскадных модулей используется следующее универсальное сокращение: ТВ-п-(N1-N2-N3-...-Nn)-h, где ТВ (термоэлектрическая батарея) — сокращенное наименование изделия; n — количество каскадов в модуле; N1...Nn — количество термоэлектрических пар в первом (опорном), втором, третьем... n-ном каскадах термоэлектрического модуля, причем N1-N2

Таблица 1. Дополнительные опции для термоэлектрических модулей

Дополнительные опции	Условное наименование*	Примечание
Температура эксплуатации до 120 °С (max), температура монтажа 130 °С (max) **	HT (120)	Сборочный припой с Tпл = 139 °С
Температура эксплуатации до 150 °С (max), температура монтажа 170 °С (max) **	HT (150)	Сборочный припой с Tпл = 183 °С
Температура эксплуатации до 200 °С (max), температура монтажа 220 °С (max) **	HT (200)	Сборочный припой с Tпл = 232 °С
> 1×10 <sup>5</sup> циклов +40/+90 °С	C	Специальное исполнение для работы в условиях температурного циклирования
Размерный ряд допусков		
Допуск на высоту ±0,025 мм (параллельность 0,02 мм; плоскость 0,015 мм)	L2	—
Допуск на высоту ±0,015 мм (параллельность 0,01 мм; плоскость 0,01 мм) ***	L3	
Металлизация холодной (mc), горячей (mh) или холодной и горячей (mm) сторон модуля с залудкой припоём (с температурой плавления 95 °С, 117 °С, 139 °С, 183 °С)	mc95, mh95, mm117 и т. д.	—
Металлизация с никелевым покрытием	mcNi, mhNi, mmNi	
Металлизация с золотым покрытием	mcAu, mhAu, mmAu	
Керамика нитрид алюминия AlN	N	Теплопроводность > 180 Вт/м·К
Герметизация		
эпоксидным герметиком	E	—
силиконовым герметиком	S	
уретановым герметиком	U	
конформным покрытием	Cc	
Нестандартная ориентация выводов	—	—
Тип и длина провода по желанию заказчика	—	—
Изготовление цепочек	—	—
Напайка на холодный или горячий радиатор, корпус или холодный блок	—	—

**Примечания:**

- \* — приведены условные сокращения, используемые для обозначения дополнительных опций в названии модуля;
- \*\* — при установке время воздействия максимальной температуры монтажа на модуль должно быть не более 2 мин.;
- \*\*\* — для ТЭМ с габаритными размерами 55,0×55,0 и более не применяется.



Рис. 14. Двухкаскадные ТЭМ



Рис. 15. Четырехкаскадный ТЭМ

используется для двухкаскадных модулей, обозначение N1-N2-N3 — для трехкаскадных модулей, а N1-N2-N3-N4 — для четырехкаскадных модулей, и т. д.;  $h$  — высота ТЭЭ первого (опорного) каскада в миллиметрах.

Рассмотрим пример записи наименования многокаскадного модуля:

Многокаскадный модуль ТВ-3(83-18-4)-1,3, ТУ 6349-001-79789858-2007. Здесь первое число — количество каскадов. Числа в скобках означают количество термопар в первом (опорном), втором и третьем каскадах соответственно. Последнее число — высота ветви первого (опорного) каскада.

Из широкого спектра дополнительных функций, описание назначения и особенностей выбора которых может послужить материалом для отдельной статьи, особо следует выделить опцию герметизации ТЭМ.

Необходимость герметизации определяется условиями эксплуатации. При работе модуля температура его холодной стороны может опускаться ниже «точки росы». При этом на холодной стороне начинает конденсироваться влага. При горизонтальном расположении модуля сконденсированная вода (в виде капель) попадает на горячую сторону, испаряется с нее и опять конденсируется на холодной стороне. Этот процесс снижает эффективность модуля. При вертикальном расположении ТЭМ конденсат будет вытекать из модуля и может повредить расположенные рядом элементы устройства. Для предотвращения этих процессов термоэлектрические модули герметизируют, что позволяет защитить их от попадания внутрь влаги из окружающей среды. Количество влаги в воздухе, который остается в модуле, незначительно и на эффективность модуля влияние не оказывает. Для герметизации модулей наибольшее рас-

Таблица 2. Сравнение свойств герметиков

Критерий	Эпоксидный герметик	Силиконовый герметик	Полиуретановый герметик
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+120	-50...+220	-40...+110
Стойкость к воздействию влаги	Очень хорошая	Хорошая, но присутствует паропроницаемость	Очень хорошая
Потери $\Delta T$ , °С	0,9-2	2-3	3-5
Приложения требующие циклирования	-	+	-/+
Возможность применения в системах глубокого охлаждения	-/+	-/+ из-за пропуска паров воды	+
Скорость полимеризации	1 день	3 дня	7 дней

пространение получили силиконовые, эпоксидные и полиуретановые герметики, а также конформное покрытие. Применение специальных материалов позволяет максимально снизить обратный поток тепла (перенос тепла от горячей стороны модуля к холодной, в обратном направлении) через слой герметика. В таблице 2 проведены сравнительные характеристики наиболее распространенных типов герметизации. Обозначение герметиков: эпоксидный — Е, силиконовый — S, уретановый — U, конформное покрытие — Сс.

Правильное определение необходимости и способа герметизации определяют надежность и эффективность эксплуатации ТЭМ в различных условиях.

#### Добротность полупроводникового вещества, ее роль в свойствах ТЭМ

Одной из наиболее важных величин, определяющих термоэлектрические свойства ТЭМ, является термоэлектрическая эффективность полупроводникового вещества, из которого он изготовлен. Термоэлектрическая эффективность характеризуется добротностью вещества и для модулей охлаждения определяет эффективностью охлаждения:

$$Z = \alpha^2 \sigma / K,$$

где  $\alpha$  — термоэлектрический коэффициент (коэффициент термо-ЭДС);  $\sigma$  и  $K$  — удельные электро- и теплопроводности соответственно.

Следует отметить, что, в целом, электрическое сопротивление (электропроводность) характеризует степень взаимодействия электронов с узлами решетки и потерю энергии (отсутствие взаимодействия соответствует эффекту сверхпроводимости),  $\alpha$  — коэффициент термо-ЭДС, характеризующийся энергией, которую электрон может перенести через контакт разнородных материалов,  $K$  — теплопроводность материала, состоящая из суммы  $K_{\text{решетки}}$  и  $K_{\text{электронного газа}}$ . Оптимальное соотношение  $\sigma$  и  $K$  теплопроводности решетки обеспечивают полупроводники, для которых наилучшие значения добротности составляют сегодня примерно  $3 \times 10^{-3}/\text{K}$ .

Чем выше значение добротности, тем выше максимальная разность температур модуля, а соответственно — тем лучше его потребительские свойства и эффективность применения в том или ином приложении.

#### Определение максимальной разности температур ТЭМ

$\Delta T_{\text{max}}$  [K] — это максимальная разность температур между спаями модуля, достигаемая при некоторой фиксированной температуре горячей спая (например:  $T_h = 300 \text{ K}$ ) и при нулевой холодильной мощности ( $Q_c = 0$ ).

Максимальная разность температур, развиваемая термоэлементом, однозначно связана с добротностью и не зависит от геометрических характеристик термоэлемента:

- Для однокаскадных ТЭМ максимальная разность температур может достигать 74–76 K. Значение  $\Delta T_{\text{max}}$  для однокаскадного модуля зависит только от эффективности термоэлектрического вещества. В настоящее время уровень технологии синтеза полупроводникового вещества позволяет компании «КРИОТЕРМ» серийно выпускать ТЭМ с максимальной разностью температур 76 K.
- Для многокаскадных модулей значение  $\Delta T_{\text{max}}$  зависит не только от эффективности вещества, но и от числа каскадов охлаждения и конфигурации модулей. Максимальная разность температур для двухкаскадных модулей повышенной мощности составляет 83–87 K, а для четырехкаскадных модулей достигает 140 K.

$I_{\text{max}}$  [A] — это ток, при котором достигается разность температур  $\Delta T_{\text{max}}$ .

$U_{\text{max}}$  [V] — напряжение, соответствующее току  $I_{\text{max}}$  и разности температур  $\Delta T_{\text{max}}$ .

$Q_{\text{max}}$  [Вт] — холодопроизводительность при токе  $I = I_{\text{max}}$  и разности температур  $\Delta T = 0$ .

В соответствии с действующими программами периодических и квалификационных испытаний компания «КРИОТЕРМ» проводит испытания максимальной разности температур ТЭМ на специализированной установке в условиях вакуума, позволяющей получать высокую повторяемость результатов испытаний.

Основными характеристиками ТЭМ являются:

- максимальная холодильная мощность  $Q$ ;
- максимальная разность температур между горячей и холодной стороной  $\Delta T$ .

Холодильная мощность определяется количеством выделенного или поглощенного тепла и рассчитывается по формуле:

$$Q = P \times I \times t,$$

где  $P$  — коэффициент Пельтье;  $I$  — сила тока;  $t$  — время.

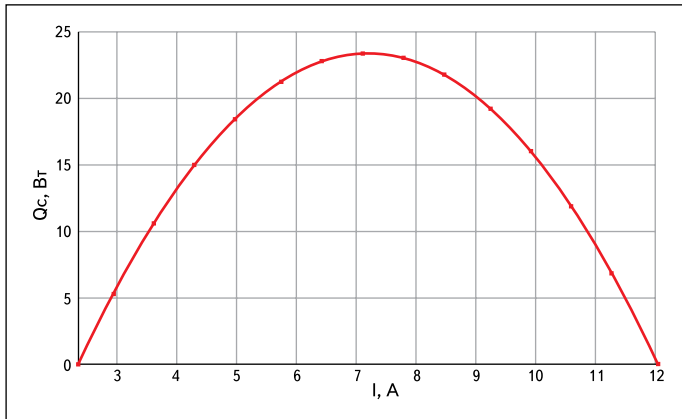


Рис. 16. Типовая зависимость холодильной мощности от силы тока, проходящего через ТЭМ

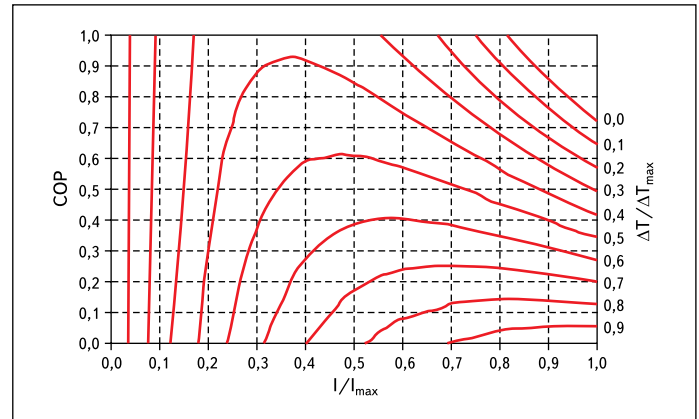


Рис. 18. График зависимости эффективности ТЭМ (COP) от относительной величины тока, пропускаемого через него

Холодильная мощность и  $\Delta T$  зависят от силы тока, проходящего через модуль. График зависимости приведен на рис. 16.

Сила тока, при которой достигается  $\Delta T_{\max}$  обозначается  $I_{\max}$ .

Величина холодильной мощности, достигаемой модулем, зависит от  $\Delta T$ . Пример графика зависимости приведен на рис. 17.

Из графика на рис. 17 следует, что достижение максимального значения разности температур  $\Delta T_{\max}$  возможно лишь в том случае, когда холодопроизводительность отсутствует:  $Q_c = 0$ . С другой стороны, при нулевой разности температур обеспечивается максимальная холодопроизводительность  $Q_{\max}$  (при токе  $I_{\max}$ ).

Здесь уместна аналогия, например, с вентиляторами, для которых максимальный напор обеспечивается при нулевом расходе, и наоборот, максимальный расход соответствует нулевому напору.

Мощность модуля  $Q_{\max}$  зависит только от отношения высоты и суммарного сечения ветвей проводника и может быть неограниченно большой. В настоящее время серийно выпускаются ТЭМ с холодильной мощностью свыше 300 Вт. Все потребительские параметры ТЭМ ( $I_{\max}$ ,  $Q_{\max}$ ,  $U_{\max}$ ,  $\Delta T_{\max}$ ) зависят от температуры горячей стороны и приводятся для  $T_h = 300$  К. Термоэлектрические характеристики будут заметно лучше при проведении их измерений при более высокой температуре горячей стороны. Некоторые производители указывают приведенные выше значения при температурах от 325 до 350 К. Это вводит в заблуждение заказчиков, так как реальные холодильные свойства будут примерно на 25% слабее.

Наряду с ключевыми параметрами ТЭМ —  $Q_{\max}$  и  $\Delta T_{\max}$  — крайне важным является характеристика эффективности термоэлектрического охлаждения. Такой характеристикой является коэффициент эффективности COP (coefficient of performance) — отношение холодильной мощности модуля к электрической энергии, им потребляемой. COP характеризует экономичность протекающих процессов

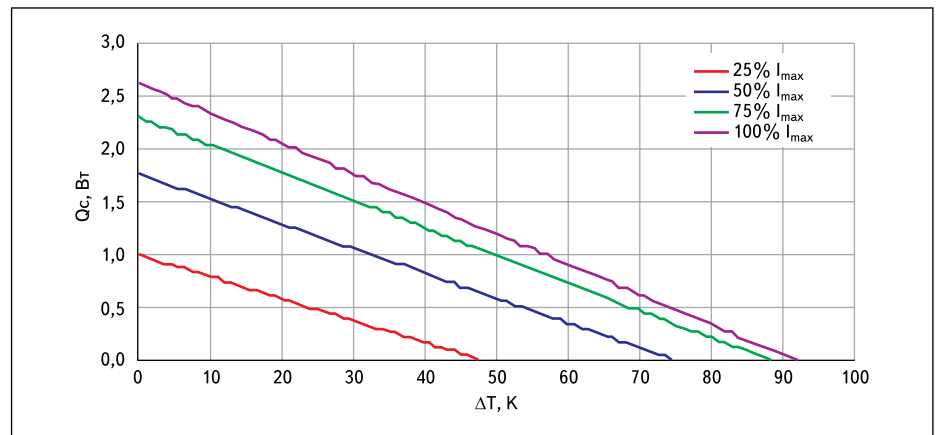


Рис. 17. Пример типовой зависимости холодильной мощности от разности температур ТЭМ

(рис. 18). При заданном значении тока COP практически линейно зависит от разности температур, и при меньших разностях температур он выше. Для термоэлектрических устройств COP в среднем составляет 0,3–0,7. Следует иметь в виду, что при нулевой разности температур и при малых токах предел холодильного коэффициента стремится к бесконечности! На практике это означает, что если необходимо иметь повышенную экономичность устройства, то предпочтительно

использовать большее количество модулей и питать их меньшим током — до тех пор, пока этого тока хватает для обеспечения  $\Delta T$  системы, то есть для компенсации обратного потока тепла.

В зависимости от режима по току для одного и того же модуля могут быть получены различные значения эффективности (рис. 19), при этом на небольших перепадах температур с малым током коэффициент COP может превышать 100%.

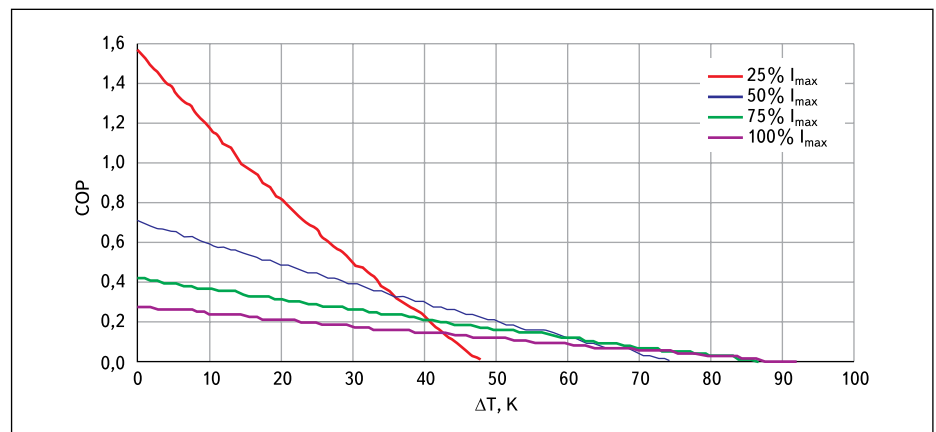


Рис. 19. Зависимость эффективности ТЭМ от разности температур и относительной величины электрического тока

## Преимущества термоэлектрического охлаждения

Возможность охлаждения до температуры значительно ниже температуры окружающей среды в сочетании с уникально малыми габаритами ТЭМ определяют основные преимущества термоэлектрического охлаждения. Обычно термоэлектрическое охлаждение конкурентоспособно при достаточно малых холодопроизводительностях. В качестве критической величины можно назвать холодильную мощность порядка 100 Вт, что и обуславливает области его применения. В задачах, когда достаточна холодопроизводительность до нескольких Вт, термоэлектрический метод охлаждения является практически безальтернативным. Его непосредственное использование для создания систем с очень высокой холодопроизводительностью (более 1 кВт), как правило, является экономически нецелесообразным. Однако если предъявляются специальные требования по надежности, автономности, взрывобезопасности, отсутствию вибраций и бесшумности работы, то и системы с холодильной мощностью в десятки кВт могут быть оправданными.

Перспективным направлением является разработка транспортных кондиционеров с учетом повышенных требований по надежности, предъявляемых к этим устройствам. Традиционно широко используется термоэлектричество, когда возникает необходимость охлаждения и термостатирования различных электронных устройств — от малагабаритных микросхем, фотоэлектроники и процессоров до электронных шкафов систем телекоммуникаций. Для упрощения решения подобных задач компанией «КРИОТЕРМ» были разработаны и запущены в серийное производство термоэлектрические сборки охлаждения (рис. 20) — устройства, в состав которых входят один или несколько ТЭМ с установленными теплообменниками. Применение термоэлектрических сборок позволяет заказчикам создавать системы охлаждения без выполнения специальных инженерных расчетов.



Рис. 20. Термоэлектрическая сборка «Воздух-Воздух»

Преимущества термоэлектрических сборок — возможность охлаждения малых объемов: кондиционирование удаленных узлов связи, где сам узел представляет собой шкаф с размерами (например) 600×600×1000 мм и применение кондиционера невозможно. Рекомендуемая температура для электроники +20...+25 °С, а в жаркие дни перегрев может составлять десятки градусов, что приводит к преждевременному выходу из строя устройств.

Отдельно следует выделить термоэлектрический нагрев, имеющий большую, по сравнению с обычными резистивными нагревателями, эффективность за счет суммирования эффекта (в данном случае тепла) Пельтье и нагрева цепи за счет джоулева тепла. Таким образом, суммарная эффективность нагрева получается >100%. Данный режим сопряжен с реверсивным включением модуля (изменением полярности включения) и, как правило, требует специального исполнения конструкции модуля (уточняется при поставке).

## Заключение

Наиболее существенные преимущества построения систем охлаждения и термостабилизации с применением ТЭМ:

- Малые габариты (<3,4×3,4 мм и менее) и вес (<2 г) определяют отсутствие альтернативных решений для термостабилизации и охлаждения в микро- и фотоэлектронике.
- Отсутствие движущихся, изнашивающихся частей, отсутствие вибрации и шума.

- Высокая надежность: компания «КРИОТЕРМ» гарантирует для своих ТЭМ среднее время наработки на отказ не менее 200 000 часов.
- Высокая охлаждающая способность на единицу веса и объема — до 150 Вт/г и до 100 Вт/см<sup>3</sup>.
- Возможность плавного и высокоточного регулирования холодопроизводительности и температурного режима.
- Малая инерционность, быстрый переход из режима охлаждения в режим нагрева.
- Отсутствие рабочих жидкостей и газов.
- Практически неограниченный ресурс работы.
- Произвольная ориентация в пространстве и поле тяжести.
- Устойчивость к динамическим и статическим перегрузкам.
- Экологическая чистота.

Окончание следует

## Литература

1. Иоффе А. Ф., Стильбанс Л. С., Иорданишвили Е. К., Ставицкая Т. С. Термоэлектрическое охлаждение. М.: АН СССР. 1956.
2. Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания. М.: Советское Радио. 1968.
3. Каганов М. А., Привин М. Р. Термоэлектрические насосы. Л.: Энергия. 1970.
4. Булат Л. П., Ведерников М. В., Вялов А. П. и др. Термоэлектрическое охлаждение. Текст лекций под общей ред. Л. П. Булата. СПб.: СПбГУНИПТ. 2002.
5. Тахистов Ф. Ю. Расчет параметров термоэлектрических модулей с учетом температурных зависимостей термоэлектрических свойств // Термоэлектрики и их применения. Доклады VIII Межгосударственного семинара (ноябрь, 2002). СПб.: ФТИ. 2002.
6. 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). СПб.: ФТИ. 2002.
7. Гершберг И. А., Тахистов Ф. Ю. Выбор оптимального ТЭМ в зависимости от условий внешнего теплообмена // Термоэлектрики и их применения. Доклады IX Межгосударственного семинара (ноябрь, 2004). СПб.: ФТИ. 2004.
8. Кузнецов Е. П., Соловей А. С., Тахистов Ф. Ю., Вялов Д. А., Гершберг И. А. Термостат биотехнологический универсальный для российского сегмента международной космической станции // Термоэлектрики и их применения. Доклады IX Межгосударственного семинара (ноябрь, 2004). СПб.: ФТИ. 2004.
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). СПб.: ФТИ. 2008.
10. [www.kryotherm.ru](http://www.kryotherm.ru)