

Министерство образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий



Кафедра электротехники

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОХЛАЖДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Методические указания
для студентов специальности 070200
“Техника и физика низких температур”

Санкт-Петербург 2001

УДК 621.565.83

Булат Л.П., Бузин Е.В. Термоэлектрические охлаждающие устройства: Метод. указания для студентов спец. 070200 “Техника и физика низких температур”. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2001. – 41 с.

Приводятся основные положения теории термоэлектрического охлаждения, описывается конструктивное оформление термоэлектрических модулей, изложены методы расчета термоэлектрических охлаждающих устройств, в том числе с помощью современных программных продуктов. Обсуждаются области применения термоэлектрического охлаждения.

Рецензент

Доктор техн. наук, проф. Н.Н. Бухарин

Одобрены к изданию советом факультета техники пищевых производств

© Санкт-Петербургский государственный
университет низкотемпературных
и пищевых технологий, 2001

ВВЕДЕНИЕ

Термоэлектрическое преобразование энергии, как метод прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, основан на электронных эффектах, возникающих в твердых телах (эффект Зеебека и другие). Уникальные свойства термоэлектрических источников энергии, такие как отсутствие движущихся частей, возможность использования низкопотенциальной тепловой энергии, полная экологическая чистота и исключительное удобство в управлении, определили неоспоримые преимущества в использовании термоэлектрических генераторов в качестве автономных источников энергии. Такие генераторы применяются на космических объектах и в медицине, в фермерских хозяйствах и на газопроводах, в морских навигационных системах и в информационных технологиях.

Обратный термоэлектрический эффект, наоборот, позволяет использовать электрическую энергию для получения холода. Эффект термоэлектрического охлаждения был впервые обнаружен и описан в 1834 году Жаном Пельтье. Это явление заключается в том, что при протекании через электрическую цепь, составленную из разнородных проводников постоянного электрического тока, в месте соединения проводников поглощается или выделяется некоторое количество тепла и, соответственно, это место цепи охлаждается или нагревается в зависимости от направления тока.

Последующие работы исследователей, пытавшихся объяснить природу явления Пельтье, показали, что количество поглощенного в месте соединения тепла пропорционально силе тока, времени его протекания и некоторому коэффициенту, зависящему от физико-химических свойств материала проводников цепи. При этом роль хладагента в термоэлектрической холодильной машине играет электронно-дырочный газ полупроводников.

Несмотря на то, что со времени открытия эффекта термоэлектрического охлаждения прошло более 165 лет, его практическое использование стало возможным лишь в последнее десятилетие.

Современные исследования в области термоэлектричества начались с работ А.Ф. Иоффе [1], который показал, что лучшими материалами для термоэлектрических преобразователей энергии (термо-электриками) являются полупроводники с примесями атомов других элементов. Он также предложил использовать термоэлектричество для создания холодильных машин совершенно иного типа – на твердотельной основе. Такие холодильники не имеют движущихся элементов и способны работать практически неограниченное время. Положения А.Ф. Иоффе инициировали активные дальнейшие работы в этом направлении [2]. В период с 1957 по 1965 гг. были проведены

исследования всех известных в то время полупроводников, полуметаллов и сплавов, обнаружены лучшие материалы для термоэлектрического охлаждения: теллуриды висмута и свинца, сплавы висмут–сурьма. Была проделана огромная теоретическая работа, построены модели, очень хорошо описывающие существующие материалы. Однако даже лучшие материалы не позволяли создавать холодильные системы достаточной эффективности.

В течение последнего десятилетия вновь происходит очевидное оживление в области термоэлектрического охлаждения [3]. Недавние исследования по созданию и поиску материалов для термоэлектриков дают основание в ближайшем будущем ожидать существенного увеличения эффективности термоэлектрических холодильных машин [4]. Возрождение интереса к применению термоэлектрического охлаждения связано также с экологическими проблемами, возникающими при использовании традиционных методов получения холода (разрушение озонового слоя, парниковый эффект и т. д.). Термоэлектрические холодильники абсолютно безопасны с экологической точки зрения, не имеют изнашивающихся и трущихся элементов, а значит бесшумны в работе, характеризуются отсутствием вибраций, не требуют штатных устройств очистки рабочих тел, способны устойчиво работать длительное время. Термоэлектрические преобразователи энергии имеют и другие преимущества:

- возможность не только охлаждения, но и нагрева;
- исключительная надежность компонентов, вырабатывающих холод;
- возможность очень быстрого охлаждения;
- высокая точность регулировки температуры и возможность термостатирования путем изменения тока питания;
- независимость параметров термоэлектрических модулей от силы тяжести и ориентации в пространстве, а также малая чувствительность к высоким механическим нагрузкам;
- отсутствие необходимости в техническом обслуживании.

Все перечисленные преимущества термоэлектрических холодильных машин порой не оставляют выбора разработчикам систем охлаждения для самых различных областей применения.

НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Виды проводимости термоэлектриков

Энергетическая эффективность термоэлектрических холодильных машин зависит от физических свойств материалов (*термо-электриков*), из которых изготовлены их активные элементы. Простейшую элементарную цепь, состоящую из двух разнородных проводников (полупроводников), которые соединены непосредственно или с помощью коммутационной пластины, обычно называют *термоэлементом* и используют в качестве простейшего термоэлектрического охладителя. Если же термоэлемент применяется в качестве простейшего термоэлектрического генератора для измерения температуры, то его называют *термопарой*.

Одним из основных параметров термоэлектриков является их удельное электрическое сопротивление ρ или удельная электропроводность $\sigma = 1/\rho$ [5]. В термоэлементах, как правило, используются полупроводники, удельная электропроводность которых зависит от легирующих примесей, температуры, давления, освещения.

Если в кристаллическую решетку полупроводника вводят атомы, внешние электроны которых связаны непрочно, то при их отрыве число свободных электронов проводимости в материале увеличивается, в результате чего электропроводность полупроводника повышается. Такие примеси называются *донорами* (полупроводники *n*-типа).

В том случае, когда в чистый материал полупроводника вводят атомы с незаполненной внешней электронной оболочкой, такие атомы укомплектовывают свой незаполненный уровень электронами соседних атомов, у которых связь электронов непрочна. Это приводит к образованию “дырки” на месте утраченного электрона у основного атома. Такой атом теряет электронейтральность и превращается в положительно заряженный ион, который стремится захватить электрон у соседнего атома. Примеси, повышающие ионную проводимость материала полупроводника, называются *акцепторными*. Если на кристалл такого полупроводника воздействовать внешним электрическим полем, то движение дырок будет противоположно движению электронов. Проводимость, обусловленная передвижением “дырок”, получила название *дырочной проводимости* (полупроводниковые материалы *p*-типа).

Таким образом, электропроводностью полупроводников можно управлять, вводя в них незначительное количество примесей. Этот способ

является основным и наиболее доступным средством изменения свойств полупроводниковых материалов. При создании в полупроводнике электрического поля возникает движение электронов и дырок, а общий ток представляет собой сумму электронного и дырочного токов. Поэтому целесообразно составлять термоэлементы из материалов с электронной и дырочной проводимостями [5].

Термоэлектрические эффекты

Работа термоэлектрических холодильных машин и генераторов базируется на термоэлектрических явлениях. К их числу относятся эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона. Эти эффекты связаны, как с превращением тепловой энергии в электрическую, так и с превращением энергии электрического тока в холод.

Эффект Зеебека состоит в том, что если в разомкнутой электрической цепи, состоящей из нескольких разнородных проводников, на одном из контактов поддерживать температуру $T_г$ (горячий спай), а на другом температуру $T_х$ (холодный спай), то при условии $T_г \neq T_х$ на концах цепи возникает термоэлектродвижущая сила E . При замыкании контактов в цепи появляется электрический ток.

Эффект Пельтье заключается в том, что при пропускании постоянного тока через термоэлемент, состоящий из двух проводников или полупроводников, в месте контакта выделяется или поглощается некоторое количество теплоты (в зависимости от направления тока). Когда электроны переходят из материала p -типа в материал n -типа через электрический контакт, им приходится преодолевать энергетический барьер и забирать для этого энергию у кристаллической решетки (холодный спай). Наоборот, при переходе из материала n -типа в материал p -типа электроны отдают энергию решетке (горячий спай) [3].

Эффект Томсона состоит в том, что при протекании электрического тока через проводник или полупроводник, в котором создан градиент температуры, в дополнение к теплоте Джоуля выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) некоторое количество теплоты. Физическая причина данного эффекта связана с тем, что энергия свободных электронов зависит от температуры. Тогда на горячем спае электроны приобретают более высокую энергию, чем на холодном. Плотность свободных электронов также растет при повышении температуры, вследствие чего возникает поток электронов от горячего конца к холодному. На горячем конце накапливается положительный заряд, на холодном – отрицательный. Перераспределение зарядов препятствует потоку электронов и при определенной

разности потенциалов совсем его останавливает. Аналогично протекают вышеописанные явления и в веществах с дырочной проводимостью, с той лишь разницей, что на горячем конце накапливается отрицательный заряд, а на холодном – положительно заряженные дырки. Поэтому в веществах со смешанной проводимостью эффект Томсона оказывается несущественным [5].

Взаимосвязь между рассматриваемыми термоэлектрическими эффектами представлена на рис. 1.

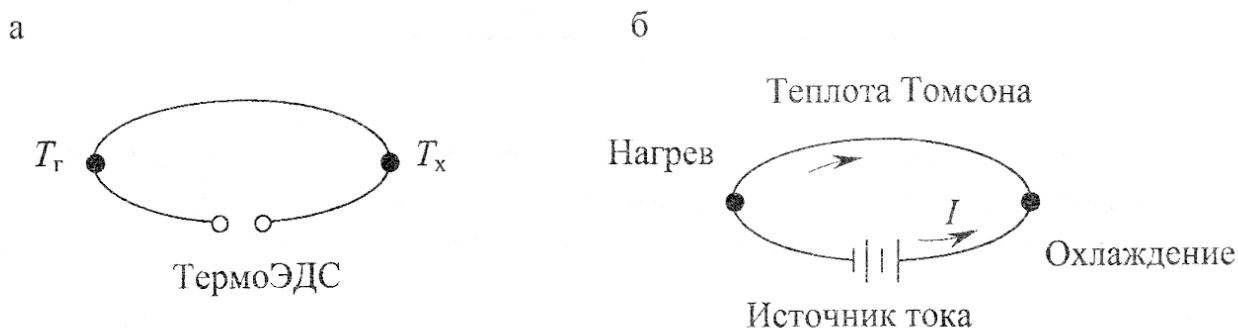


Рис. 1. Термоэлектрические эффекты:
а – эффект Зеебека; б – эффект Пельтье

Термоэлектрический модуль

Основными элементами любой термоэлектрической холодильной машины являются так называемые *термоэлектрические модули* (рис. 2) – небольшие устройства, представляющие собой последовательно соединенные в электрическую цепь полупроводниковые термоэлементы, каждый из которых состоит из двух полупроводниковых столбиков *p*- и *n*-типа (их называют также *ветвями*). Иными словами, термоэлектрический модуль представляет собой *термоэлектрическую батарею*, состоящую из термоэлементов, причем количество термоэлементов в разных модулях может меняться от нескольких штук до нескольких сотен. По тепловому потоку полупроводниковые столбики в модуле соединены параллельно. Столбики, как в сэндвиче, заключены между двумя пластинами (обычно керамическими), которые хорошо проводят тепло, но являются электрическими изоляторами.

Различные фирмы в разных странах мира серийно производят термоэлектрические охлаждающие модули примерно одинаковых типоразмеров, так называемый, мелкоровский ряд (по названию компании Melcor, США, которая первой освоила серийное производство подобных модулей). Подчеркнем, что российские компании «Криотерм», «Норд», «Остерм» и другие занимают лидирующее место в мире по качеству производимых модулей.

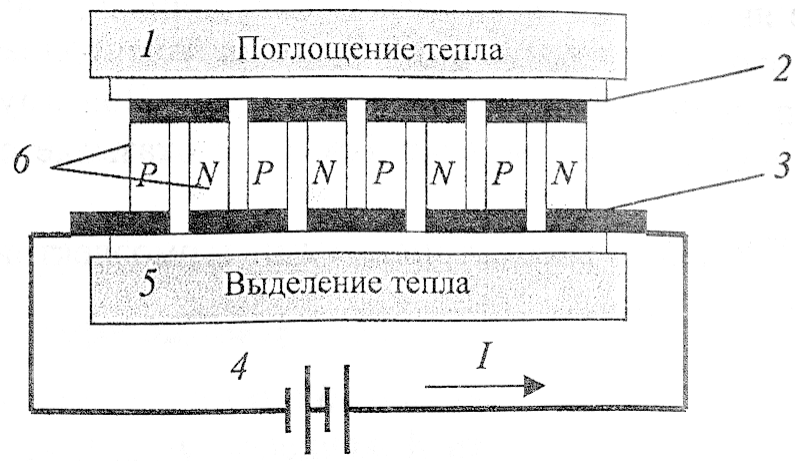


Рис. 2. Принципиальная схема термоэлектрического холодильного блока:
 1 – объект охлаждения; 2 – источник постоянного тока; 3 – полупроводники *p*- и *n*-
 типов; 4 – электропроводник; 5 – электроизолятор; 6 – теплоотводящий элемент

Модуль – самостоятельный охлаждающий узел. Однако он не может работать без отвода теплоты от горячей стороны. Поэтому термоэлектрический *холодильный блок* всегда состоит из трех частей [6]:

- термоэлектрического модуля или модулей;
- радиатора горячей стороны модуля;
- охлаждаемого объекта на холодной стороне.

Охлаждаемый объект может находиться в непосредственном тепловом контакте с холодной стороной модуля, однако чаще используется теплопроводящая пластина, либо воздушный или жидкостной теплообменник.

Общий вид термоэлектрического охлаждающего модуля представлен на рис. 3.



Рис. 3. Типичные термоэлектрические модули

Основные расчетные соотношения для охлаждающего термоэлемента

Рассмотрим работу термоэлемента, состоящего из двух полупроводниковых ветвей 3 с электронной и дырочной проводимостями и из металлических контактных перемычек 5 (этому случаю соответствует рис. 2, если там оставить только одну пару ветвей). При распространении постоянного тока в указанном направлении нижние перемычки нагреваются, а верхние – охлаждаются. В этом случае верхнюю перемычку называют холодным спаем (температура T_x), а нижнюю – горячим спаем (температура T_r).

Количество теплоты, которое выделяет горячий спай, будет больше теплоты, которую поглощает холодный спай, на величину затрат электроэнергии [5]:

$$Q_r = P + Q_0. \quad (1)$$

Энергия P расходуется на совершение работы A по перемещению зарядов против разности электрических потенциалов, возникающих в цепи при неравенстве T_r и T_x в соответствии с законом Зеебека. Таким образом,

$$A = Q_r - Q_x = \alpha T_r I - \alpha T_x I = \alpha I (T_r - T_x). \quad (2)$$

где α – коэффициент дифференциальной термоЭДС, зависящей от физических свойств материала и его температуры; I – сила тока.

Холодильный коэффициент обратного цикла термоэлемента, в котором роль рабочего вещества выполняет электронный газ и отсутствуют необратимые потери, определяется формулой

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{A} = \frac{\alpha T_x I}{\alpha I (T_r - T_x)} = \frac{T_x}{T_r - T_x}. \quad (3)$$

Величина ε совпадает с холодильным коэффициентом обратного цикла Карно, так как теплота отводится при постоянной температуре T_r , а подводится к горячему источнику при постоянной температуре T_x .

В действительности работа термоэлемента сопровождается необратимыми потерями двух типов: распространение тока по проводнику влечет джоулевые потери, а по проводникам, из которых состоит цепь, непрерывно идет теплота от горячего спая к холодному за счет теплопроводности.

Джоулевые потери определяются соотношением:

$$Q_{дж} = I^2 R, \quad (4)$$

где R – сопротивление ветвей термоэлемента.

С высокой степенью точности можно считать, что половина теплоты, выделяющейся в цепи в виде джоулевых потерь, поступает к холодному спая, а половина – к горячему.

Теплота, переходящая от горячего спая к холодному

$$Q_m = \lambda (T_r - T_x), \quad (5)$$

где λ – средний удельный коэффициент теплопроводности ветвей термоэлемента.

Таким образом, холодопроизводительность термоэлемента с учетом потерь определится из выражения

$$Q_0 = \alpha T_x I - 0,5 I^2 R - \lambda (T_r - T_x). \quad (6)$$

Теплота, отводимая от горячего спая

$$Q = \alpha T_r I - 0,5 I^2 R - \lambda (T_r - T_x). \quad (7)$$

Реальная работа цикла с учетом потерь

$$A_{ц.д} = Q - Q_0 = \alpha I (T_r - T_x). \quad (8)$$

Холодильный коэффициент реального цикла термоэлектрической холодильной машины

$$\varepsilon_d = \frac{\alpha T_x I - 0,5 I^2 R - \lambda (T_r - T_x)}{I^2 R + \alpha I (T_r - T_x)}. \quad (9)$$

Таким образом, холодильный коэффициент зависит от величины питающего термоэлемент тока. Можно показать, что максимальное значение холодильный коэффициент приобретает при токе [7]

$$I = \frac{\alpha (T_r - T_x)}{R [\sqrt{1 + 0,5 Z (T_r + T_x)} - 1]}. \quad (10)$$

Материалы для термоэлектрических преобразователей (термоэлектрики) характеризуются добротностью Z . Данный параметр определяет

ся физическими свойствами термоэлектрика – электропроводностью σ , теплопроводностью k и коэффициентом термоЭДС α связанными формулой

$$Z = \sigma\alpha^2/k. \quad (11)$$

Введем вспомогательный коэффициент M

$$M = \sqrt{1 + 0,5Z(T_{\Gamma} + T_{\text{X}})}.$$

Тогда, подставляя (10) в (9), получаем

$$\varepsilon_{\max} = \frac{T_{\text{X}}}{T_{\Gamma} - T_{\text{X}}} \frac{M - T_{\Gamma} / T_{\text{X}}}{M + 1}. \quad (12)$$

Важно отметить, что холодильный коэффициент зависит от разности температур $(T_{\Gamma} - T_{\text{X}})$, создаваемой термоэлектрической батареей, и величины Z , характеризующей свойства термоэлектрика. Холодильный коэффициент стремится к своему максимальному значению ε_{\max} при $Z \rightarrow \infty$. Поэтому основная задача термоэлектрического материаловедения – повышение добротности используемых материалов [3].

Режимы работы охлаждающих термоэлементов

Термоэлектрический холодильник может работать в различных режимах, наиболее важными из которых являются: режим максимального холодильного коэффициента ε_{\max} и режим максимальной холодопроизводительности Q_{\max} . В первом случае термоэлемент будет наиболее эффективно преобразовывать потребляемую электрическую энергию в “холод”, во втором – в ущерб экономичности может быть получено наибольшее понижение температуры. Иными словами, режим ε_{\max} характеризует наиболее экономичную работу термоэлектрического холодильника, в то время как режим Q_{\max} обеспечивает максимальное количество отведенного тепла в единицу времени.

В условиях максимальной холодопроизводительности холодильный коэффициент можно представить в виде

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{2T_{\Gamma}} \left(T_{\text{X}} - \frac{2(T_{\Gamma} - T_{\text{X}})}{Z T_{\text{X}}} \right). \quad (13)$$

Режимы, близкие к максимальной холодопроизводительности используются в маломощных системах, в которых экономия электроэнергии не является важным фактором. Напротив, в достаточно мощных устройствах це-

лесообразно использовать режимы, близкие к условиям максимального холодильного коэффициента [3].

На практике термоэлектрические холодильники обычно работают при токах, составляющих 25–80 % I_{\max} .

Для термоэлектрического охладителя очень просто изменять режим работы от ε_{\max} до Q_{\max} , и наоборот, а также работать в некотором промежуточном режиме путем изменения электрического напряжения. Иными словами, термоэлектрический охладитель отличается высокая функциональная гибкость.

Режим Q_{\max} соответствует максимально возможному значению рабочего тока в термоэлементе. Для режима ε_{\max} характерно то, что рабочий ток меняется в соответствии с изменением разности температур на спаях.

На рис. 4 и рис. 5 представлены типичные графические зависимости холодильного коэффициента и холодопроизводительности от перепада температур на термоэлементе для случаев режима максимального холодильного коэффициента и максимальной холодопроизводительности [5].

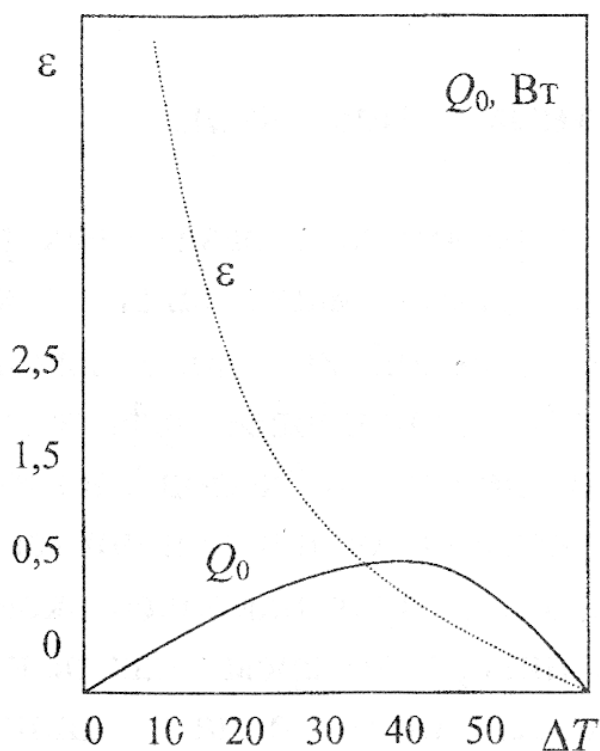


Рис. 4. Зависимость холодильного коэффициента ε и холодопроизводительности Q_0 от разности температур для режима максимального холодильного коэффициента

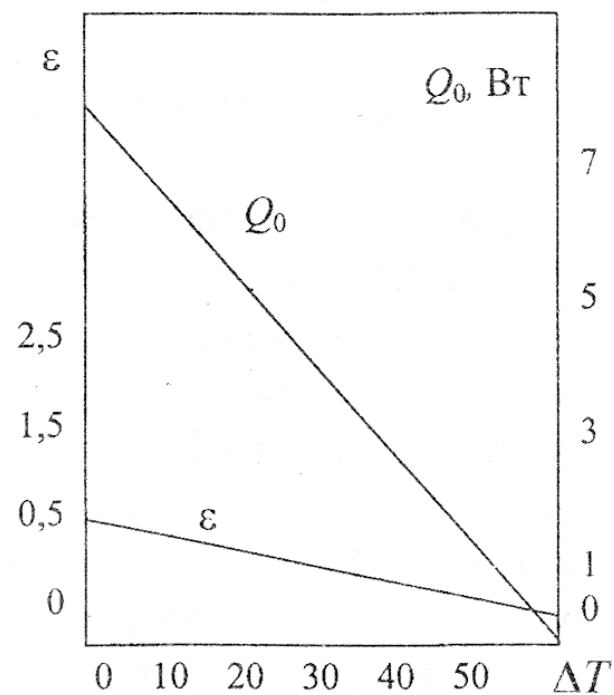


Рис. 5. Зависимость холодильного коэффициента ε и холодопроизводительности Q_0 от разности температур для режима максимальной холодопроизводительности

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Материалы для термоэлектрических преобразователей характеризуются добротностью Z полупроводникового вещества. Как уже было отмечено, данный параметр определяется физическими свойствами вещества – электропроводностью σ , теплопроводностью k и коэффициентом термоЭДС α , связанными формулой (11).

Чем выше Z , тем лучше свойства термоэлектрика, выше его эффективность, больше максимальное снижение температуры на спаях [5]. Холодильный коэффициент стремится к своему максимальному значению $\epsilon_{\text{Карно}}$ при $Z \rightarrow \infty$. Поэтому основная задача термоэлектрического материаловедения – поиск или создание материалов с возможно более высокой добротностью.

Величины, входящие в состав уравнения (11), взаимосвязаны, так как зависят от концентрации свободных электронов или дырок. Соответствующие зависимости представлены на рис. 6.

Электропроводность пропорциональна концентрации носителей n , а термоЭДС стремится к нулю при увеличении n . Теплопроводность k состоит из двух частей ($k = k_p + k_s$): теплопроводности кристаллической решетки (k_p), которая практически не зависит от n и электронной теплопроводности (k_s), пропорциональной n [2].

В металлах и металлических сплавах величина Z очень мала из-за низкого коэффициента термоЭДС, в диэлектриках она также мала из-за малой электропроводности σ . В области полупроводниковых концентраций носителей Z достигает своего максимального значения. Этим и объясняется широкое применение в настоящее время полупроводников в качестве термоэлектриков.

Эффективность термоэлектриков зависит также от температуры T (рис. 7) [2].

В настоящее время все термоэлектрические материалы являются полупроводниками со значительными концентрациями примесей. Однако обнаружены редкоземельные материалы, которые имеют гораздо более высокие значения так называемого фактора мощности $\sigma\alpha^2$. К сожалению, такие материалы имеют высокую теплопроводность k , которая не позволяет им достигать высоких значений Z . Тем не менее, на основе редкоземельных соединений можно создавать новые термоэлектрические материалы, активно используемые [2]. В термоэлектрическом материаловедении основные усилия направлены на то, чтобы найти материал с максимально высоким значением безразмерного параметра ZT .

Для этого важно знать, как Z зависит от свойств материала. Выражение для безразмерного параметра ZT в общем случае имеет вид [2]

$$ZT = F(B, E_G/k_B T), \quad (14)$$

где B – так называемый фактор качества (содержит большое количество параметров, в том числе химический потенциал, значение валентности химической связи атомов, плотность материала); k_B – постоянная Больцмана, E_G – ширина запрещенной зоны полупроводника.

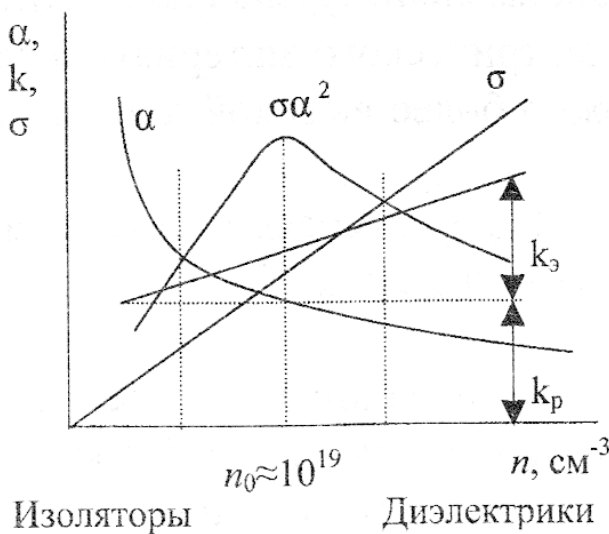


Рис. 6. Зависимость параметров α , σ и k от концентрации носителей

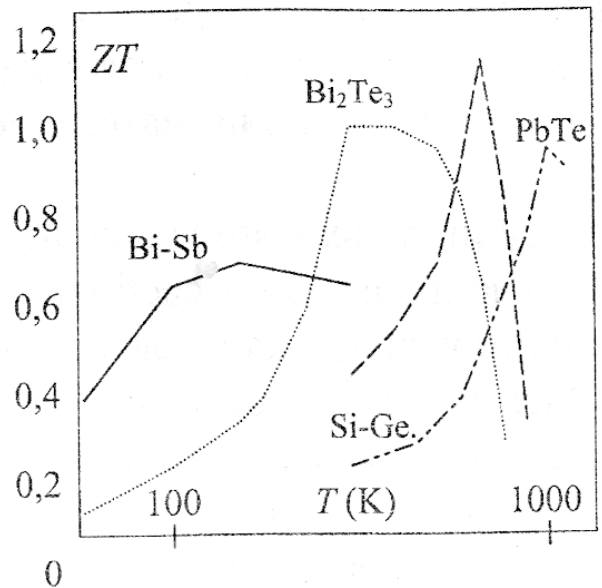


Рис. 7. Зависимость ZT от температуры для n -типа Bi-Sb, Bi_2Te_3 , PbTe и Si-Ge

Махан [2] систематизировал требования, которым должны удовлетворять лучшие термоэлектрики:

1. Быть многовалентными. Как минимум необходима 4-валентная связь.
2. Иметь высокую подвижность электронов или дырок ($\mu > 1000 \text{ см}^2/\text{Всек}$).
3. Иметь высокую плотность (для достижения максимально возможного значения B - фактора).
4. Обладать низкой теплопроводностью. Теплопроводность кристаллической решетки должна находиться в пределах от 0.5 до 1.0 Вт/м К.

Низкой теплопроводностью характеризуются материалы с высоким атомным весом входящих в их состав элементов. Такие материалы имеют малую энергию кристаллической решетки и незначительную собственную

теплопроводность. Вот почему лучшие термоэлектрики создаются из висмута, теллура, свинца и аналогичных элементов.

Другой способ снижения теплопроводности материала k_p – создание сложных структур со множеством атомов в ячейке кристаллической решетки (для уменьшения среднего свободного пробега) путем сплавления.

Ещё одна стратегия – введение в кристаллическую решетку примесей, атомы которых способны вращаться вокруг своей оси. Этот способ особенно эффективен для снижения теплопроводности материала полупроводника.

Исследования по созданию и поиску материалов с высокой добротностью ведутся в последнее время по трем направлениям [3]:

1. Создание функционально неоднородных материалов, то есть материалов, в которых целенаправленно формируется пространственная неоднородность для увеличения их добротности.

2. Исследование скуттерудитов – материалов со структурой минерала $CoAs_3$. В частности изучение $CoAs_3$, $RbAs_3$, $CoSb_3$, $RhSb_3$ и $IrSb_3$ показало перспективность использования их в качестве термоэлектриков.

3. Исследование сверхрешеток с квантовыми ямами (Quantum-Well Superlattice - QWSL) дало очень важные результаты. Понятие “квантовая яма” используется для обозначения области термоэлектрика, в которой средняя потенциальная энергия носителей заряда ниже, чем вне её [7]. Создавая чередование квантовых ям (например, путем послойного напыления материала), можно образовать периодическую структуру QWSL. В таких структурах наблюдается существенное возрастание термоэлектрической добротности [6].

Определенные успехи были достигнуты в последние годы по всем трем направлениям. Но наибольший – получен в исследовании QWSL-структур, в которых удалось добиться увеличения термоэлектрической добротности сразу в 3–6 раз по сравнению с исходными материалами. Энергетический спектр электронов в квантовых ямах отличается от спектра в объеме полупроводника. Эти результаты получены в лабораториях разных стран и успешно воспроизводятся. Такой огромный успех в создании новых материалов можно сравнить разве что с открытием высокотемпературных сверхпроводников.

Зависимость относительного холодильного коэффициента $\varepsilon/\varepsilon_{\text{Карно}}$ от добротности Z для различных разностей температур ΔT представлена на рис. 8. Штриховой линией показано предельное значение Z для материалов, обычно используемых сейчас в промышленном производстве модулей [3].

Можно надеяться, что для упомянутых выше перспективных термоэлектриков, в обозримом будущем будет достигнуто значение $ZT = 4$. В этом случае термоэлектрические холодильные машины будут характери-

зоваться высокой эффективностью, и иметь неоспоримое преимущество перед парокомпрессионными в области малых холодопроизводительностей [3].

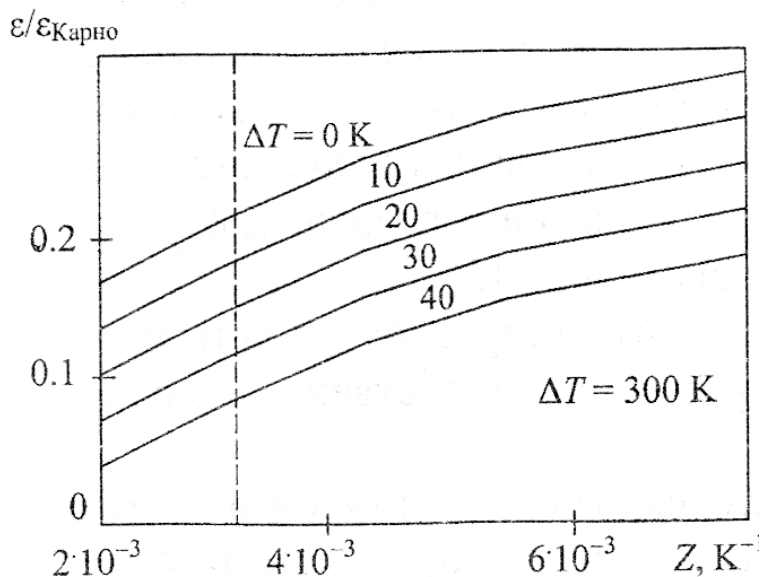


Рис. 8. Зависимость относительного холодильного коэффициента от добротности Z при различных разностях температур $\Delta T = T_r - T_x$

Пока же наибольшее распространение для термоэлектрического охлаждения получили материалы, исходными веществами для которых являются висмут, сурьма, селен, теллур. Максимальная эффективность этих материалов при комнатной температуре составляет $Z = 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ для n - и p -типа.

Наиболее часто для создания охлаждающих термоэлементов применяются термоэлектрики на основе твердых растворов теллурида висмута $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ и $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$. Твердые растворы Bi-

Se используются в области температур ниже $250 \text{ } ^\circ\text{K}$. Максимального значения $Z = 6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ этот материал достигает при температуре $T = 80 \dots 90 \text{ } ^\circ\text{K}$. Интересно отметить, что эффективность сплава значительно повышается в магнитном поле (эффекты Нернста, Эттингсхаузена и др.).

Область повышенного интереса исследователей – работа термоэлектрика при наложении переменных электрического и магнитных полей [2].

КОНСТРУКЦИОННОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Керамические материалы

Большинство термоэлектрических модулей состоит из батареи термопар, помещенных между двумя теплопереходами, выполненными, как правило, из керамических пластин (рис. 1, 2). Материал, из которого изготавливаются такие пластины, должен являться хорошим электроизолятором, иметь достаточно высокую механическую прочность, обладать

высокой теплопроводностью, сравнимой с теплопроводностью меди (386 Вт/м К). Размер керамических пластин определяет геометрические параметры всего модуля, поскольку площадь поверхности блока термоэлементов составляет лишь около 40 % от поверхности пластины.

В качестве керамических теплопереходов в основном используется материал на основе оксида алюминия (Al_2O_3) с теплопроводностью порядка 25 Вт/м К. Оксид бериллия обладает гораздо более высокой теплопроводностью – 250 Вт/мК, но он является слишком дорогим сегодня, и, кроме того, токсичным. Прекрасными свойствами и очень высокой теплопроводностью – 180 Вт/мК, характеризуется нитрид алюминия (AlN). Стоимость этого материала, которая несколько лет назад была сравнительно высокой, в настоящее время снижается в связи с массовым его производством, и это уже довольно распространённый материал.

Модули, производимые без керамических теплопереходов, являются более компактными, поскольку элементы в них разделены лишь тонким слоем электроизолятора толщиной около 0.1 мм. В таких модулях, тем не менее, необходима электроизоляция между медными контактами и теплообменником. В основном для этого используется тонкий органический изолятор, такой как мулар или кэптон [8].

Эффективность термоэлектрического модуля зависит в первую очередь от качества материала полупроводника, и, в меньшей степени, от теплопроводности электроизолятора, будь то керамический, или органический изоляционный материал.

Тепловое сопряжение термобатарей (модульный интерфейс)

Минимальным тепловым сопротивлением обладает паяный интерфейс. Сегодня производители термоэлектрических холодильных устройств сопрягают модули с керамикой при помощи так называемой “термосмолы” (эпоксидная смола) – порошка оксида цинка в жидком стекле. Существуют также термоподложки [8]. Такое сопряжение позволяет проводить значительные тепловые потоки, что существенно снижает тепловое сопротивление поверхности между керамической пластиной и металлическим теплообменником, которое составляет порядка $0.35 \text{ Ксм}^2/\text{Вт}$. Керамика на основе оксида алюминия толщиной 0.6 мм имеет тепловое сопротивление $0.24 \text{ Ксм}^2/\text{Вт}$ (порядка сопротивления её интерфейса). Лист кэптона толщиной 50 мкм обладает сопротивлением $0.5 \text{ Ксм}^2/\text{Вт}$ и имеет два интерфейса сопротивлением $0.35 \text{ Ксм}^2/\text{Вт}$ каждый.

Теплообменники

До настоящего времени рынок термоэлектрических модулей существовал для “универсальных” модулей, которые могли различными способами монтироваться на практически любой теплообменник. Сегодня растёт доля рынка термоэлектрических модулей, которые производятся для конкретных целей с уже встроенными теплообменниками [8].

Две подобные технологии представляются наиболее перспективными.

Специальные алюминиевые теплообменники с электроизоляцией контактов

По данной технологии термоэлектрические модули монтируются непосредственно на теплообменник, оребранный алюминиевыми пластинами. Основным недостатком здесь является различие коэффициентов теплопроводности в алюминиевых и медных контактах. Данная технология, возможно очень экономичная, требует подтверждения с точки зрения надёжности.

Теплообменники из нитрида алюминия

Преимущество такой технологии в том, что нитрид алюминия является прекрасным проводником тепла и отличным электроизолятором, наряду с тем, что он обладает высокой механической прочностью. Следовательно, при использовании данной технологии можно значительно упростить интерфейс термоэлектрического модуля.

ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Важные преимущества термоэлектрического метода получения холода в сравнении с другими типами охлаждения обусловили широкую сферу приложений этого метода.

В зависимости от холодопроизводительности можно выделить три класса использования термоэлектрических холодильных машин [3].

1. Маломощные охладители ($Q_0 < 100$ Вт). Подавляющее число термоэлектрических холодильников относятся именно к этому классу. При таких мощностях они сравнимы с компрессионными машинами с экономической точки зрения.

2. Термоэлектрические холодильники средней мощности ($100 < Q_0 < 500$ Вт). При таких мощностях экономическая эффективность термоэлектрических холодильников, как правило, ниже, чем компрессионных.

3. Высокоточные охладители ($Q_0 > 500$ Вт). Применение термоэлектрических холодильников для создания таких мощностей может быть оправдано при выполнении каких-либо специфических требований, таких как повышенные требования к весу, размерам, устойчивости к перегрузкам, необходимости автономной работы и т. п. Например, в США разработана термоэлектрическая микроклиматическая установка для пилотов вертолетов с $Q_0 = 1$ кВт.

Кроме того, приложения термоэлектрического охлаждения могут быть классифицированы по областям применения.

К *термоэлектрическим холодильникам потребительского назначения* относятся портативные пикник-боксы, переносные домашние холодильники, охладители для напитков (соков, вина), стационарные охладители-фильтры воды, нагреватели-охладители детского питания, холодильники для гостиничных номеров.

Использование постоянного тока делает очень удобным *применение термоэлектрических охладителей на транспорте*. Разработаны автомобильные мини-холодильники, автомобили с термостатированным кузовом, охладители автомобильных сидений и мотоциклетных шлемов, охладители питьевой воды для самолетов и пассажирских железнодорожных вагонов. Созданы термоэлектрические блоки для кондиционеров на поездах шведских и французских железных дорог [3]. Проходят испытания термоэлектрические кондиционеры на российских железных дорогах. Представляются весьма перспективными автомобильные локальные кондиционеры для комфортного охлаждения водителя или одного пассажира.

Использование термоэлектрического охлаждения в *промышленности и системах телекоммуникаций* – это управление температурными процессами, в том числе точное поддержание температуры различных электронных блоков, жесткая защита критических систем от внешних тепловых воздействий, термостатирование микропроцессоров вычислительных систем и систем автоматики, охлаждение волоконно-оптических систем и лазерных диодов с целью стабилизации их параметров.

На *предприятиях торговли и питания* используются охлаждаемые бары для напитков и охлаждаемые витрины, устройства для охлаждения и взбивания масла, мороженого и сливок, индивидуальные порционные охладители блюд, охладители молока и т. п.

Применения термоэлектрического охлаждения *в медицине*. Это приборы для анализа крови, стационарные и переносные холодильники для лекарств, в том числе домашние охладители инсулина, оборудование для препарирования и хранения тканей, биостимуляторы, криогенные пинцеты для офтальмологии, криогенные скальпели, охлаждаемые предметные столики для микроскопов, охлаждаемые подложки для зубоврачебного цемента, термостатированные терапевтические одеяла, персональные больничные холодильники.

Далеко не полный список *лабораторного и научного оборудования* с использованием термоэлектрических охладителей включает: охлаждаемые инфракрасные детекторы, рефрактометры, лазерные коллиматоры, фотоумножители, ПЗС матрицы, интегральные схемы, электронные платы, спектрофотометры, термопрограмматоры, охлаждаемые камеры и мешалки, детекторы точки замерзания и точки росы, эталоны абсолютно черного тела, ячейки для электрофореза, осмометры, анализаторы загрязнения воздуха, приборы определения температуры застывания нефти.

Другие примеры применения термоэлектрического охлаждения можно найти в литературе [4].

РАСЧЁТ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Расчёт охлаждающей термобатареи в режиме максимального холодильного коэффициента

Иногда требуется произвести расчёты основных параметров термобатареи при заданных условиях эксплуатации и заданной холодопроизводительности при использовании полупроводникового вещества с известными характеристиками. Такими параметрами являются:

- холодильный коэффициент;
- мощность, которую будет потреблять термобатарея из сети;
- теплота, выделяемая на горячих спаях;
- падение напряжения на одном термоэлементе;
- число термоэлементов;
- сопротивление одного термоэлемента и всей термобатареи;
- соотношение между длиной и сечением ветвей.

В табл. 1 представлены результаты и порядок расчёта конкретной термобатареи на основании следующих исходных данных: добротность материала $Z = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$; коэффициент термоЭДС $\alpha = 3.7 \cdot 10^{-3} \text{ В/К}$; коэффициент электропроводности $\sigma = 8 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$; требуемая холодопроизводительность $Q_0 = 20 \text{ Вт}$; условия эксплуатации $T_x = 280 \text{ } ^\circ\text{K}$, $T_\Gamma = 310 \text{ } ^\circ\text{K}$; источник питания $U_\Pi = 12 \text{ В}$.

Таблица 1

№ пп	Определяемая величина	Расчётная формула	Результат расчёта
1	Вспомогательный коэффициент	$M = \sqrt{1+0,5Z(T_\Gamma+T_x)}$	1.35
2	Холодильный коэффициент	$\varepsilon_{\max} = \frac{T_x}{T_\Gamma-T_x} \frac{M-T_\Gamma/T_x}{M+1}$	0.96
3	Мощность P , Вт	$P = Q_0 / \varepsilon_{\max}$	21
4	Теплота горячих спаев Q_Γ , Вт	$Q_\Gamma = P + Q_0$	41
5	Падение напряжения U_0 , В	$U_0 = \frac{\alpha(T_\Gamma-T_x)M}{M-1}$	0.043
6	Число термопар	$N = U_\Pi / U_0$	280
7	Оптимальный ток $I_{\text{опт}}$, А	$I_{\text{опт}} = P / U_\Pi$	1,75
8	Сопротивление термобатареи R , Ом	$R = \frac{\alpha(T_\Gamma-T_x)N}{I_{\text{опт}}[\sqrt{1+0,5Z(T_\Gamma+T_x)}-1]}$	5,1
9	Сопротивление термопары R_0 , Ом	$R_0 = R / N$	0,0182
10	Соотношение длины и сечения ветви	$l / S = \gamma R_0 / 2$	728
11	Сечение ветви, мм^2	$S = l / N$	5,5

Отметим, что режим максимального холодильного коэффициента в практических целях используется достаточно редко.

Подчеркнем также, что расстояние l между саями термоэлемента обычно не превышает 2 мм, поскольку при малых длинах возникают слишком большие теплопритоки с горячего сая на холодный. Чрезмерное же увеличение длины приводит к излишнему расходу материала и увеличению хрупкости конструкции.

Расчёт термобатареи в режиме максимальной холодопроизводительности

При заданной геометрии ветви и известных характеристиках полупроводникового вещества требуется рассчитать:

- число термоэлементов;
- ток, проходящий через них;
- напряжение источника питания;
- потребляемую термобатареей мощность;
- холодильный коэффициент.

В табл. 2 представлены результаты и порядок расчёта конкретной термобатареи на основании следующих исходных данных: длина термоэлемента $l = 4$ мм; сечение $S = 5.5$ мм²; добротность материала $Z = 2.8 \cdot 10^{-3}$ °К⁻¹; коэффициент термоЭДС $\alpha = 3.7 \cdot 10^{-4}$ В/К; коэффициент электропроводности $\sigma = 8 \cdot 10^4$ Ом⁻¹м⁻¹; требуемая холодопроизводительность $Q_0 = 20$ Вт; условия эксплуатации $T_x = 280$ К, $T_\Gamma = 310$ К.

Таблица 2

№ пп	Определяемая величина	Расчётная формула	Результат расчёта
1	Оптимальный ток $I_{\text{опт}}$, А	$I_{\text{опт}} = \alpha T_x \sigma S / (2l)$	5.7
2	Падение напряжения U_0 , В	$U_0 = \alpha T_\Gamma$	0.115
3	Холодильный коэффициент	$\varepsilon_d = \frac{1}{2T_\Gamma} \left(T_x - \frac{2(T_\Gamma - T_x)}{Z T_x} \right)$	0.96
4	Сопротивление термопары R_0 , Ом	$R_0 = 2l / \sigma \cdot S$	0,0182
5	Холодопроизводительность термопары Q' , Вт	$Q' = \frac{\alpha^2}{R_0} \left(\frac{T_x^2}{2} - \frac{T_\Gamma - T_x}{Z} \right)$	0.22
6	Число термопар N	$N = Q_0 / Q'$	91
7	Мощность, затрачиваемая одной термопарой, P_0 , Вт	$P_0 = Q_0 / \varepsilon_d$	0.76
8	Мощность источника питания P_0 , Вт	$P = P_0 \cdot N$	69,16
9	Теплота горячих спаев Q_Γ , Вт	$Q_\Gamma = P + Q_0$	89
10	Напряжение источника питания $U_{\text{п}}$, В	$U_{\text{п}} = U_0 \cdot N$	10,5

Параметры, лежащие в основе выбора стандартного термоэлектрического модуля

Выбор стандартного термоэлектрического модуля для конкретного применения основывается, по крайней мере, на трех параметрах [9]. Ими являются температуры горячей T_{Γ} и холодной T_{χ} сторон модуля, а также тепловая нагрузка Q_0 , которую следует отводить от холодной стороны.

Расчёт температуры горячей стороны модуля

Горячей стороной модуля является та сторона, на которой тепло выделяется при подаче постоянного электрического тока. На эту сторону монтируется теплообменник. При использовании воздушного охлаждения последнего (естественный или вынужденный теплообмен), температура горячей стороны может быть рассчитана по формуле

$$T_{\Gamma} = T_{\text{окр}} + R_{\Gamma} Q_{\Gamma}, \quad (15)$$

где $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С, R_{Γ} – тепловое сопротивление теплообменника горячей стороны модуля, °С/Вт; Q_{Γ} – теплота, выделяемая на горячих спаях, Вт.

$$Q_{\Gamma} = P + Q_0, \quad (16)$$

Здесь P – подводимая мощность, Вт.

Наличие теплового сопротивления теплообменника приводит к тому, что температура горячей стороны становится выше температуры окружающей среды на некоторую величину. Если тепловое сопротивление неизвестно, то оценить эту величину можно для различных случаев теплообмена:

- естественная конвекция – от 20 до 40 °С;
- вынужденная конвекция – от 10 до 15 °С;
- жидкостное охлаждение – от 2 до 5 °С (выше температуры охлаждающей жидкости).

Теплообменник является ключевым компонентом данной конструкции. Если поверхность теплообмена оказывается недостаточной, то желаемое охлаждение может быть не достигнуто.

Расчёт температуры холодной стороны модуля

Холодной стороной термоэлектрического модуля является та сторона, на которой тепло поглощается при пропускании через термобатарею постоянного тока. Температура холодной стороны T_{χ} должна быть ниже температуры охлаждаемого объекта $T_{\text{об}}$, особенно если он не находится с ней в непосредственном тепловом контакте

$$T_{\chi} = T_{\text{об}} - R_{\chi} Q_0. \quad (17)$$

Расчёт требуемой холодопроизводительности

Расчёт тепловой нагрузки, которую необходимо отводить с холодной стороны модуля для понижения температуры охлаждаемого объекта на определённую величину, представляется достаточно сложным, так как все тепловые нагрузки должны быть учтены. Среди таких нагрузок необходимо указать следующие:

– непосредственно тепло, которое необходимо отводить от охлаждаемого объекта для понижения его температуры на определённую величину

$$Q = iG, \quad (18)$$

где i – энтальпия охлаждаемого вещества, G – его массовый расход, кг/с;

– теплоприток с горячей стороны модуля вследствие теплопроводности;

– тепло, выделяемое проводниками при прохождении через них электрического тока (с высокой степенью точности полагают, что половина джоулевого тепла I^2R поступает на холодную сторону, а половина – на горячую);

– теплоприток через слой теплоизоляции

$$Q_{\text{прит}} = \lambda \Delta T S / \delta, \quad (19)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/мК; δ – толщина слоя теплоизоляции, м; ΔT – перепад температур по толщине слоя, °К; S – поверхность теплоизоляции, м²;

– затраты “холода” на охлаждение материалов конструкции (теплообменник, трубопроводы подачи и т. д.).

Управление работой термоэлектрического охладителя

Работа любого термоэлектрического модуля характеризуется параметрами I_{max} , V_{max} , Q_{max} и ΔT_{max} при определённом значении $T_{\text{г}}$. Работа при максимальных значениях тока относительно неэффективна вследствие высоких значений джоулевого тепла. Поэтому обычно работают при значениях тока, составляющих от 25 до 80 % его максимальной величины. Подводимая мощность определяет температуру горячей стороны и холодопроизводительность при данной нагрузке.

Для любого термоэлектрического охладителя значение Q_{max} соответствует I_{max} и V_{max} при нулевой разности температур. Значение ΔT_{max} соответствует максимальной разности температур между холодной и горячей сторонами модуля для I_{max} и V_{max} при отсутствии нагрузки $Q_0 = 0$.

Пример

Разрабатываемая система охлаждения должна иметь холодопроизводительность 22 Вт; теплообменник с конвективным теплообменом вынужденного типа, с тепловым сопротивлением $0.15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Вт}$; объект, который нужно охладить до $5 \text{ }^\circ\text{C}$ (находится в непосредственном тепловом контакте с холодной поверхностью); температура окружающей среды $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Разработчик системы охлаждения располагает термоэлектрическим модулем Kryotherm Frost-74 с функциональными характеристиками [10]:

$$\begin{aligned}I_{\max} &= 6.3 \text{ А}; \\Q_{\max} &= 65.0 \text{ Вт}; \\V_{\max} &= 16.7 \text{ В}; \\\Delta T_{\max} &= 74 \text{ }^\circ\text{C}.\end{aligned}$$

Требуется определить, подойдет ли такой модуль для разрабатываемой системы.

Принимаем температуру $T_x = 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Полагая для теплообменника данного типа температуру на $10 \text{ }^\circ\text{C}$ выше температуры окружающей среды, оценим $T_r = 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Поскольку входная мощность неизвестна, точное значение T_r не может быть определено.

Тогда приближенно $\Delta T = 35 - 5 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 9 и 10 представлены рабочие кривые зависимостей разности температур от напряжения и холодопроизводительности соответственно для модуля Kryotherm Frost-74 при температуре горячей стороны $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Согласно рис.9 пересечение линий ΔT и Q_0 показывает, что данный модуль способен производить 22 Вт холода при разности температур $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ со значением вводимого тока 3.1 А. Последнее значение было определено при допущении $T_r = 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Поскольку определена мощность, подводимая модулю, уравнения (15) и (16) могут быть использованы для расчета T_r и определения того, было ли начальное приближение T_r допустимо точным.

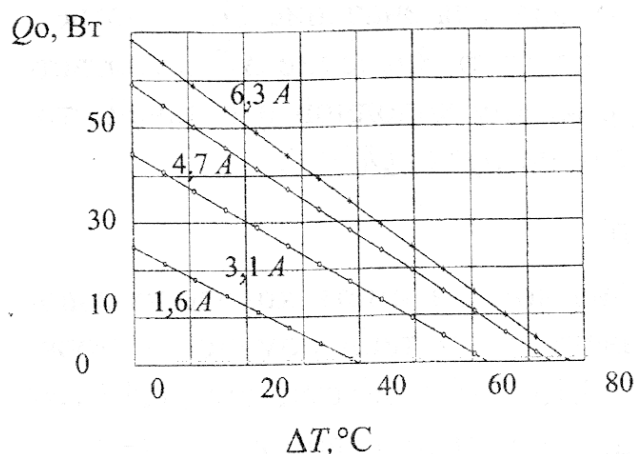


Рис. 9. Рабочие кривые зависимости ΔT от холодопроизводительности Q_0 при различных значениях силы тока I

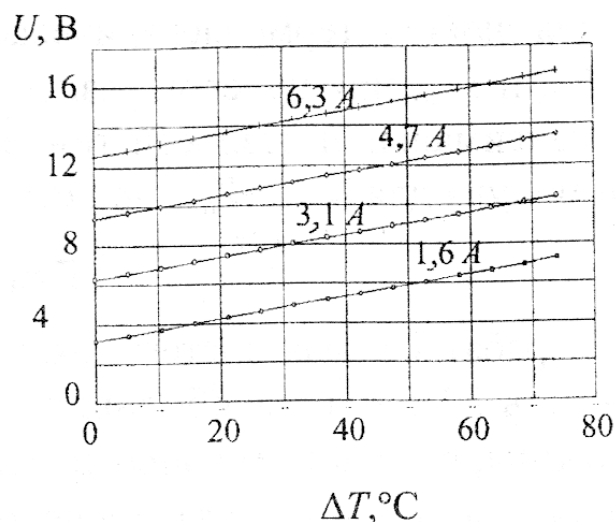


Рис. 10. Рабочие кривые зависимости ΔT от напряжения U при различных значениях силы тока I

Затрачиваемая мощность есть произведение тока на напряжение. Значение напряжения можно получить, используя рис. 10, на котором пересечение линий тока в 3.1 А и разности температур в $\Delta T = 30$ °С даёт значение напряжения приблизительно в 8 В.

Решая уравнения (15) и (16) относительно T_r , получаем:

$$Q_r = 22 + (3.1 \cdot 10) = 22 + 31 = 53 \text{ Вт};$$

$$T_r = 25 + (0.15 \cdot 53) = 25 + 8.0 = 33.0 \text{ °С}.$$

Расчётное значение T_r близко к начальной её оценке. Это позволяет заключить, что модуль Kryotherm Frost-74 способен работать для данного применения. Если же требуется точное решение относительно T_r , расчёт может быть повторен математически до того момента, пока значение T_r уже не изменится.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ РАСЧЁТА И ВЫБОРА СТАНДАРТНЫХ МОДУЛЕЙ

На сегодня известны две фирмы, изготавливающие термоэлектрические модули, которые разработали специальные компьютерные программы расчёта и выбора стандартных модулей для конкретного применения [10, 11]. Так, ИПФ «Криотерм» (Санкт-Петербург) предлагает довольно удобную для пользователей программу на магнитных носителях в виде компакт-дисков. Эта программа доступна также на сайте компании в Интернете по адресу: www.kryotherm.spb.ru. Можно воспользоваться и программой американской фирмы “Melcor” по адресу: www.melcor.com.

На начальном этапе проектирования термоэлектрической системы необходимо определить, при каких параметрах она должна работать. Этими параметрами являются температура окружающей среды и температура объекта, который требуется охладить. Разность данных температур окажет влияние на эффективность работы системы охлаждения. Кроме того, важной характеристикой является требуемая холодопроизводительность – тепло, которое должно быть отведено от объекта с помощью термоэлектрических модулей. Эта величина определит количество модулей. С помощью любой из указанных программ может быть рассчитано значение холодопроизводительности, если известны размеры системы охлаждения, характеристики изоляции и другие величины.

На примере использования программы “Kryotherm” обратимся к разделу "Расчёт холодопроизводительности".

На основе анализа исходных данных система выдаст ответ на вопрос, сколько модулей и какого типа необходимо использовать в системе охлаждения. Предлагаемое количество модулей зависит от выбранного варианта оптимизации – по минимуму стоимости модулей или по максимальному значению холодильного коэффициента. В случае оптимизации по стоимости количество модулей минимально, однако эффективность их работы ниже, чем в режиме максимума холодильного коэффициента. В разделе программы "Выбор модуля" указываются необходимые рабочие параметры модуля – оптимальные ток, напряжение, потребляемая мощность и другие величины. Для каждого из вариантов предлагаются графические зависимости параметров и дополнительная информация, из чего можно получить более полное представление о работе термоэлектрической системы охлаждения.

Одним из самых важных вопросов для разработчиков термоэлектрических устройств является проблема обеспечения передачи тепла от объекта к холодной стороне модуля и от горячей стороны к среде. Для того чтобы не было значительных паразитных перепадов температуры на элементах конструкции, необходимо использовать высокоэффективные радиаторы, в том числе охлаждаемые потоком жидкости. Определяющей характеристикой радиатора является величина его теплового сопротивления. Программа даёт рекомендации касательно того, какую величину теплового сопротивления должен иметь радиатор на горячей стороне термоэлектрических модулей и каким образом можно выбрать из каталогов подходящий радиатор.

Входные данные

Программы [10, 11] производят подбор наиболее подходящих модулей для разрабатываемой термоэлектрической системы охлаждения. Для та-

кого подбора нужно задать определенный набор входных данных – температуру окружающей среды ($T_{ambient}$), температуру охлаждаемого объекта (T_{object}), холодопроизводительность (Q_{cold}), а также тепловое сопротивление на холодной стороне системы охлаждения (R_{cold}).

Величина R_{cold} характеризует полное тепловое сопротивление между объектом и холодной стороной всех термоэлектрических модулей. В качестве первого приближения можно принять, что тепловое сопротивление на холодной стороне равняется нулю. Если разработчиком уже решено, как будет осуществляться передача тепла от объекта к модулям, то следует ввести суммарную величину теплового сопротивления выбранных радиаторов.

Также можно указать, каким способом будет охлаждаться горячая сторона системы. Теплопередача от горячей стороны термоэлектрических модулей может осуществляться путем естественной или вынужденной конвекции, а также при помощи потока жидкости. При подборе варианта использования модулей такие пожелания учитываются величиной теплового сопротивления R_{hot} .

На основе исходных данных программой будут рассчитаны температуры горячей T_{hot} и холодной T_{cold} сторон модуля.

Геометрия объекта

Для определения холодопроизводительности необходимо задать геометрию объекта, т. е. определить его форму и размеры. С помощью, так называемых, радиокнопок в меню программы можно выбрать одну из форм (параллелепипед или цилиндр), наиболее подходящую для проектируемого объекта. Затем необходимо ввести внутренние размеры объекта. В случае параллелепипеда это будут ширина W_i , высота H_i , длина L_i , в случае цилиндра это будут высота H_i и диаметр D_i .

Нагрузка

Под нагрузкой W_{object} понимается выделяющаяся в объекте тепловая энергия, которая должна быть отведена с помощью термоэлектрических модулей. Если в объекте тепловыделение отсутствует, то следует выбрать пассивную нагрузку. В противном случае следует выбрать активную нагрузку и задать численное значение тепловой энергии, которая выделяется в охлаждаемом объекте.

Изоляция

Для того чтобы температура объекта поддерживалась более низкой, чем температура окружающей среды, выгодно применять тепловую изоляцию объекта. Программа предлагает список материалов, которые обычно используют в качестве изоляторов. Также необходимо ввести толщину изоляции t_h .

Режим охлаждения

Довольно часто возникает необходимость охлаждения объекта до определенной температуры за какое-то время, т. е. речь идет о нестационарном режиме. В этом случае необходимо указать время, за которое объект должен понизить свою температуру от $T_{ambient}$ до T_{object} , а также ввести характеристики материала объекта – его плотность и удельную теплоемкость. Для наиболее распространенных материалов программа приводит список данных характеристик.

Результаты расчета

В результате расчета определяется требуемая холодопроизводительность Q_{cold} . На основе этого значения для системы охлаждения будут подобраны подходящие термоэлектрические модули.

В случае стационарного режима значение холодопроизводительности Q_{cold} необходимо поддерживать постоянным во времени. В случае нестационарного режима значение холодопроизводительности Q_{cold} необходимо поддерживать в течение заданного времени охлаждения. По истечении этого времени объект достигает температуры T_{object} , и в дальнейшем потребуются поддерживать меньшее значение холодопроизводительности – холодопроизводительность в стационарном режиме Q_{stat} . В нестационарном режиме значение Q_{cold} стремится к значению Q_{stat} , если время охлаждения стремится к бесконечности.

В качестве результатов расчета приводится величина теплового сопротивления между объектом и окружающей средой R_{ins} , а также внутренний объем параллелепипеда или цилиндра.

Оптимизация, сортировка и просмотр вариантов

Программа приводит список всех термоэлектрических модулей, с помощью которых можно обеспечить заданные требования к системе охлаж-

дения, и их оптимальные характеристики. Задача подбора варианта для термоэлектрической системы охлаждения решается в одном из двух режимов – максимального холодильного коэффициента (COP) или минимальной стоимости модулей. Основной особенностью режима максимального холодильного коэффициента является повышенная экономичность работы, но при этом требуется достаточно большое количество модулей. В режиме минимальной стоимости задача может быть решена при использовании меньшего количества модулей, однако значения холодильного коэффициента оказываются заниженными.

При любой выбранной оптимизации разработчик имеет возможность просмотреть варианты в том порядке, в котором они расположены в каталоге фирмы [10,11], либо отсортировать их по оптимизируемому параметру (холодильному коэффициенту или стоимости модулей).

Также предоставляется возможность вывести на экран и на печать произвольное количество вариантов. В этом случае необходимо задать начальную и конечную позиции списка решений. Использование несортированного списка позволяет просматривать отдельные группы модулей.

Варианты решения задачи охлаждения

Программа предлагает варианты применения всех термоэлектрических модулей стандартного ряда, которые могут удовлетворить заданным условиям охлаждения.

Каждый модуль следует использовать в количестве m штук, причем для случаев оптимизации по холодильному коэффициенту и по минимальной стоимости модулей будут предложены различные значения m . В каждом варианте приводится значение COP (холодильного коэффициента).

К каждому модулю необходимо прикладывать рабочее напряжение U (В) и рабочий ток I (А). W (Вт) – электрическая мощность, потребляемая модулем от источника питания. Q_{hot} (Вт) – тепловая энергия, выделяющаяся на горячей стороне термоэлектрического модуля. Для отвода данной энергии рекомендуется иметь на каждый модуль теплообменный аппарат с тепловым сопротивлением равным или меньшим величины R_{hot} .

Графические зависимости

В разделе "Выбор модуля" программа предусматривает построение графиков основных рабочих зависимостей. Для каждого варианта могут быть построены стандартные графики

$$\begin{array}{lll}
Q_0 = f(I_{\text{раб}}); & T_x = f(I_{\text{раб}}); & U = f(I_{\text{раб}}); \\
Q_0 = f(U_{\text{раб}}); & T_x = f(U_{\text{раб}}); & U = f(\Delta T). \\
Q_0 = f(\Delta T); & \varepsilon_x = f(\Delta T); &
\end{array}$$

Особенности работы программы “Kryotherm”

Выбор модулей, схемы соединения и источника питания

Данная программа позволяет проводить расчеты систем охлаждения и термостатирования, использующих полупроводниковые термоэлектрические модули производства ИПФ "Криотерм" [10]. Программа представляет свыше 150 различных модулей, и пользователь всегда может просмотреть его параметры в конкретной конструкции термоэлектрической системы. Для выбора модуля необходимо нажать на кнопку "Select Module" и выбрать одну из закладок с типом модуля. Также необходимо определить количество таких модулей. Последние могут быть соединены параллельно, последовательно или последовательно-параллельно. Выбор схемы соединения необходим, когда разработчик ориентируется на определенный источник питания. Программа позволяет задавать напряжение или ток источника мощности.

Определение параметров холодной и горячей сторон

Для определения характеристик модуля в термоэлектрической системе необходимо задать параметры холодной и горячей сторон (тепловые сопротивления R_h и R_c). Программа предлагает ввести или рассчитать промежуточное тепловое сопротивление. Оно учитывает особенности крепления модулей (через теплопроводную пасту и теплопровод).

Расчет промежуточного теплового сопротивления

В термоэлектрических системах крепление модулей к теплообменникам осуществляется через специальное вещество, служащее для уменьшения контактного термического сопротивления. Обычно это контактная теплопроводная паста (коэффициент теплопроводности около 0.8 Вт/м К). Между теплообменником и модулем может располагаться теплопровод. Его наличие может быть связано с особенностями конструкции термоэлектрической системы. Программа позволяет учесть наличие теплопровода и теплопроводной пасты в термоэлектрической системе.

Расчет теплового сопротивления теплообменника

Теплообменники обычно представляют собой пластинчатые радиаторы, изготавливаемые из алюминия или другого материала с высокой теплопроводностью. Тепловое сопротивление радиатора зависит от его габаритов, оребрения, коэффициента теплопроводности материала и коэффициента конвективной теплоотдачи к поверхности радиатора. Коэффициент теплоотдачи определяется типом теплопередачи и средой (газ или жидкость). Программа дает возможность рассчитать коэффициент теплоотдачи, когда теплопередача осуществляется вынужденной конвекцией, или когда задан поток.

На основе исходных данных программа рассчитывает тепловое сопротивление оребренной поверхности теплообменника. Также важно учесть передачу тепла от оребренной поверхности к термоэлектрическим модулям по основанию радиатора. Программа дает возможность ввести значение соответствующего коэффициента неравномерности поля температур. Зная тепловое сопротивление оребренной поверхности радиатора, размеры основания и коэффициент неравномерности, можно определить тепловое сопротивление основания радиатора.

В сумме тепловые сопротивления основания и оребренной поверхности радиатора дают общее тепловое сопротивление радиатора по горячей или холодной стороне. Эта величина во многом будет определять эффективность работы термоэлектрической системы.

Расчет коэффициента теплоотдачи

Тепловое сопротивление теплообменника в значительной степени зависит от величины коэффициента теплоотдачи. Программа позволяет провести все промежуточные теплофизические расчеты и в конечном итоге – рассчитать коэффициент теплоотдачи. Следует отметить, что в этом смысле данную программу удобно использовать для любых тепловых расчетов из курса “Процессы и аппараты”.

Кроме того, система позволяет оценить и гидравлическое сопротивление теплообменника. Знание этой величины необходимо для подбора вентилятора или насоса, который сможет обеспечить заданный расход теплоносителя.

Результаты расчета термоэлектрической системы

Основной целью и результатом вычислений является определение температуры объекта T_{ob} в конкретной термоэлектрической системе. В случае охлаждения потока основной целью вычислений является определение температуры T_{cfl} потока на выходе после контакта с холодной стороной термоэлектрической системы охлаждения.

Температурное поле

В качестве результатов расчета приводится распределение температурного поля в системе охлаждения. Разность температур между горячей и холодной сторонами $dT = T_h - T_c$, развиваемая термоэлектрическим модулем, состоит из трех составляющих:

- перепада температур по горячей стороне $T_h - T_a$;
- охлаждения объекта относительно среды $T_a - T_{ob}$;
- перепада температур по холодной стороне $T_{ob} - T_c$.

Модули ИПФ “Криотерм” в принципе позволяют развивать разность температур до 76 °К, однако из-за наличия тепловой нагрузки Q_c рабочая разность температур на сторонах модуля всегда меньше. В бытовых термоэлектрических устройствах охлаждение объекта относительно среды обычно составляет 20...30 °К, перепад температур по горячей стороне – 15...25 °К, перепад температур по холодной стороне – 10...15 °К.

Энергетические характеристики

Помимо распределения температур, программа позволяет вычислить характеристики работы модулей в термоэлектрической системе. Этими характеристиками являются ток через модуль I (А), напряжение на модуле U (В), электрическая мощность, потребляемая модулем $W = IU$ (Вт), холодопроизводительность Q_c (Вт) и тепловая мощность, выделяющаяся на горячей поверхности модуля $Q_h = Q_c + W$ (Вт).

Особенности работы программы “Melcor”

В отличие от программы “Kryotherm” данная программа [11] не позволяет проводить столь глубокие теплофизические расчеты, что является существенным ее недостатком. В целом же порядок расчета и рекомендации относительно выбора теплообменной аппаратуры остаются схожими в обеих программах. К сожалению, программа “Melcor” предоставляет информацию лишь об ограниченном ассортименте своей продукции. Кроме того, результаты расчетов не располагают здесь столь детальными сведениями о выбранной термоэлектрической системе охлаждения, как это обеспечивается программой “Kryotherm”. Последняя, ко всему прочему, снабжена более удобным интерфейсом, что делает работу пользователя более комфортной.

В качестве определенного преимущества программы “Melcor” следует отметить, что она предоставляет возможность разработки термоэлектрической системы для генерации электричества и располагает всеми необходимыми для этого комментариями. Вообще данная программа содержит целое пособие (на английском языке), содержащее информацию по практически

всем разделам термоэлектричества. Что касается программы “Kryotherm”, то здесь содержится информация, более полезная с практической точки зрения (в части последовательности и организации расчетов).

В любом случае данные программы позволяют существенно облегчить все необходимые для разработки конкретной термоэлектрической системы расчеты и выбор стандартного модуля.

В приложении представлены результаты работы обеих программ на конкретном примере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956.
2. G.D. Mahan. Good Thermoelectrics// Solid State Physics. 1998. Vol. 51, pp. 81–157.
3. Булат Л.П. Термоэлектрическое охлаждение: состояние и перспективы // Холодильная техника.1999. № 7, с. 12–14.
4. Thermoelectric Materials – New Directions and Approaches // MRS, Pittsburgh, 1998. V.478. – 348 p.
5. Бараненко А.В. и др. Холодильные машины: Учеб. для студентов вузов специальности «Техника и физика низких температур» / Под общ. ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 1997. – 992 с.
6. Handbook of Thermoelectric – London, N.Y.: CRC Press, 1995.
7. Anatyчук L.I. Physics of Thermoelectricity. – Kyiv, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity. 1998.
8. Stockholm J.G. Current state of Peltier cooling // Proceedings of XVI Intern. Conf. On Thermoelectrics. Dresden, Germany. 1997.
9. Godfrey S. An Introduction to Thermoelectric Coolers // Electronics Cooling.1996. vol.2. No.3.
10. Kryotherm. Engineering and Production Firm. Thermoelectric Software v. 3.0.
11. Melcor Co. Thermoelectric Design/Selection Guide // Thermoelectric Software.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пусть требуется разработать термоэлектрическую систему холодопроизводительностью 22 Вт для охлаждения объекта от температуры окружающей среды ($T_{amb} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) до конечной температуры $T_{ob}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тепловым сопротивлением теплообменника холодной стороны можно пренебречь. Тепловыделение в объекте отсутствует. Требуется произвести оптимизацию расчета по минимуму стоимости модулей. В качестве результатов привести характеристики выбранного модуля.

Результаты работы программы “Kryotherm”

На рис. 11–15 представлены результаты расчетов, характеристики выбранных модулей, графические зависимости, полученные в результате работы программы “Kryotherm”.

The screenshot shows the 'Choice of Modules' window with the following settings:

- Input parameters:** Type of Cooling: forced; Ambient: T_a (K) = 308; Object: T_{ob} (K) = 278; R_c (K/W) = 0.00; Q_c (W) = 22.00; Result: T_h (K) = 328.0, T_c (K) = 278.0.
- Optimize by ...:** COP max, COST min.
- View ...:** 10 top modules, from 1 to 10.
- Sorting...:** Sorted.
- Calculating and sorting variants:** Start calculations.

N°	Module	n	COP	I (A)	U (V)	W (W)	Qh (W)	Rh (K/W)
1	DB114L	1	0.3175	5.2	13.4	69.3	91.3	0.22
2	TB-127-1,0-0,8	1	0.3175	5.2	13.4	69.3	91.3	0.22
3	TURBO-1,3 (Parralel)	1	0.3641	5.3	11.5	60.4	82.4	0.24
4	TURBO-1,3 (Serial)	1	0.3578	2.6	23.2	61.5	83.5	0.24
5	TURBO-1,5 (Serial)	1	0.3349	2.6	25.5	65.7	87.7	0.23
6	TURBO-1,5 (Parralel)	1	0.3335	5.2	12.8	66.0	88.0	0.23
7	TB-127-1,4-1,2	1	0.3829	5.2	11.0	57.4	79.4	0.25
8	TB-127-1,4-1,5	1	0.3518	5.0	12.6	62.5	84.5	0.24
9	FROST-71	1	0.3728	4.8	12.3	59.0	81.0	0.25
10	FROST-72	1	0.3945	4.6	12.0	55.8	77.8	0.26

Рис. 11. Результаты расчетов по выбору модуля

Initial Data of Task and Temperatures

T_a (K) = 308, T_{ob} (K) = 278, Q_c (W) = 22.00, R_c (K/W) = 0.00

Type of Cooling - forced ; Optimize by COST min; Sorted

T_h (K) = 328.0, T_c (K) = 278.0, dT (K) = 50.00

Solution

Thermoelectric module - CHILL

Optimal quantity n (pcs) = 1

Position number in the list of solutions - 1

Thermoelectric Module Parameters

Coefficient of performance: COP = 0.3175

Cooling capacity: for one module (W) = 22.00 for all modules (W) = 22.00

Power supply: for one module (W) = 69.3 for all modules (W) = 69.3

Operating current (A) = 5.2 (in case of parallel connection (A) = 5.2)

Operating voltage (V) = 13.4 (in case of series connection (V) = 13.4)

Parameters for Heat Exchangers Design

Thermal resistance of heat exchanger at the cold side (K/W) = 0.00
(related to one module (K/W) = 0.00)

Thermal resistance of heat exchanger at the hot side (K/W) = 0.22
(related to one module (K/W) = 0.22)

Heat removed from the hot side: for one module (W) = 91.3

for all modules (W) = 91.3

Area of module (mm²) = 1600 Area of all modules (mm²) = 1600

Heat flux density at the hot side: q (W/m²) = 57063

Heat emission effective coefficient at the hot side: k (W/(m²·K)) = 2853

Рис. 12. Информация о выбранном модуле

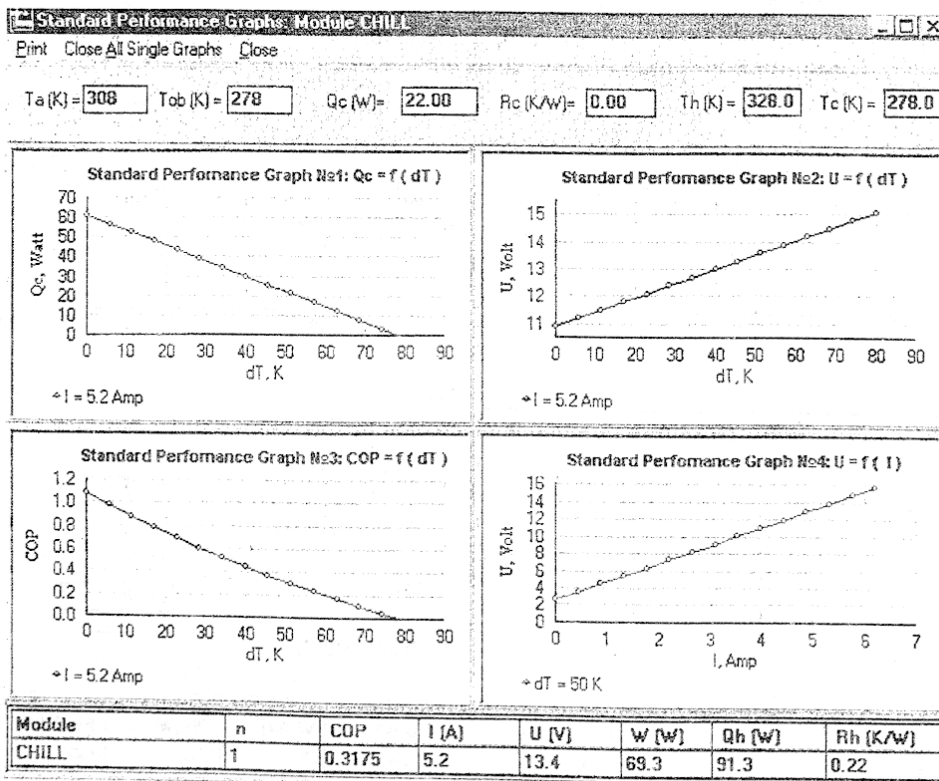


Рис. 13. Стандартные рабочие характеристики выбранного модуля

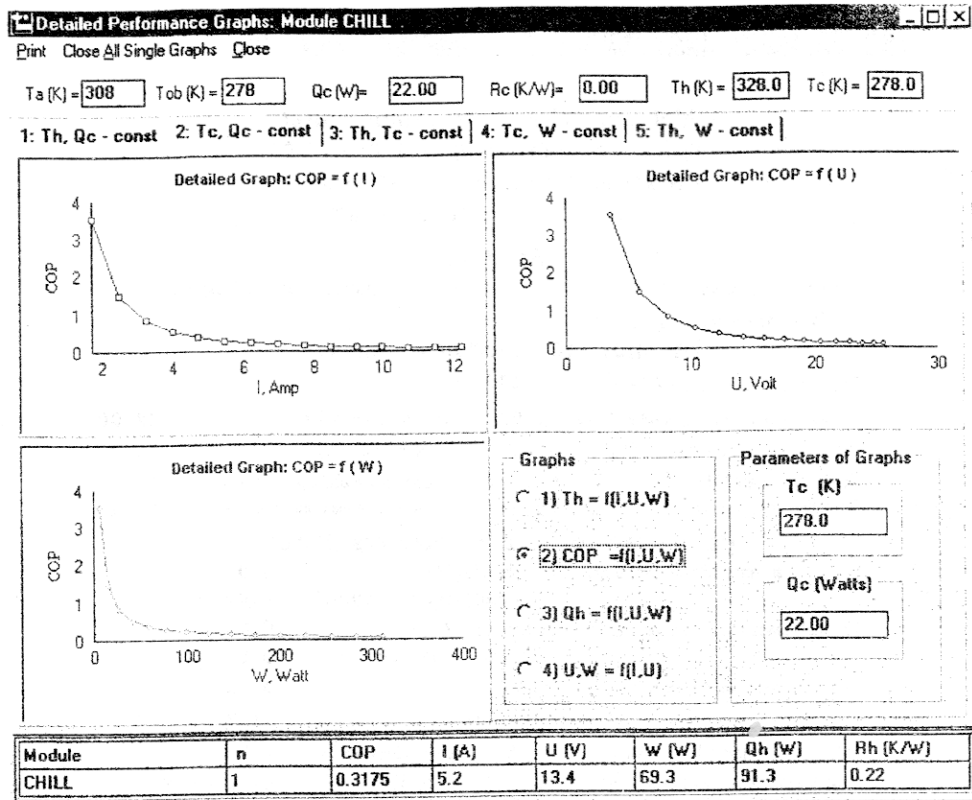


Рис. 14. Некоторые детализированные графические зависимости рабочих характеристик выбранного модуля

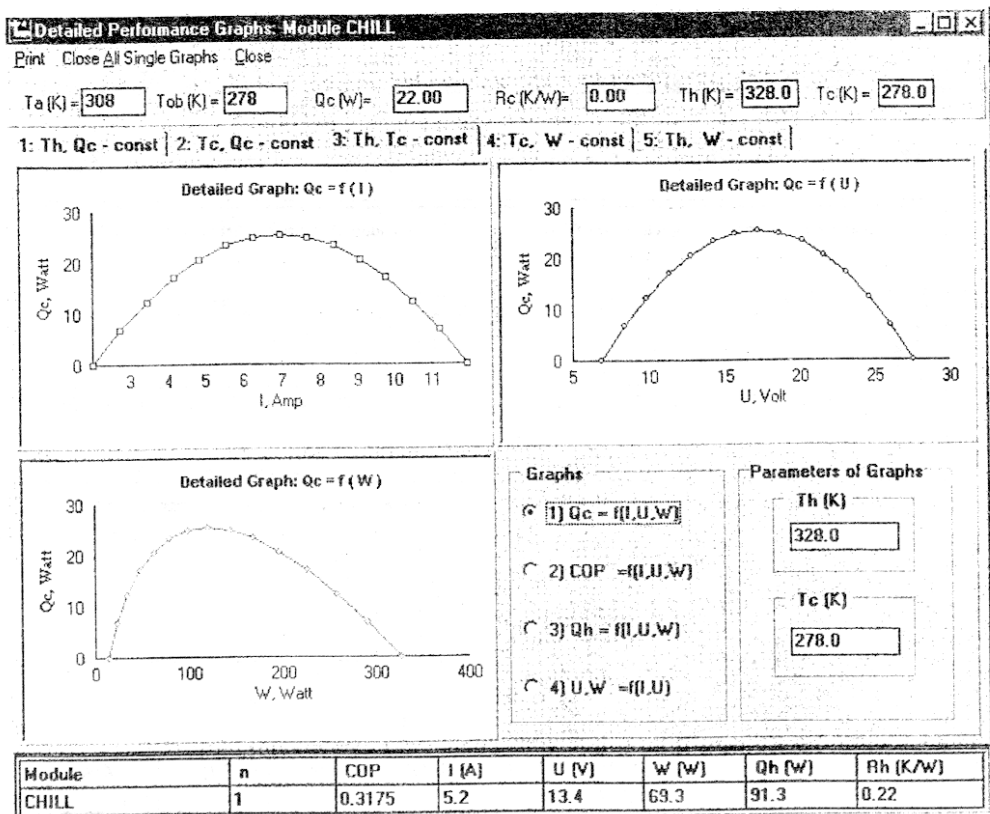


Рис. 15. Другие детализированные графические зависимости рабочих характеристик выбранного модуля

Результаты работы программы "Melcor"

На рис. 16–17 представлены результаты расчетов, характеристики выбранных модулей, графические зависимости, полученные в результате работы программы "Melcor".

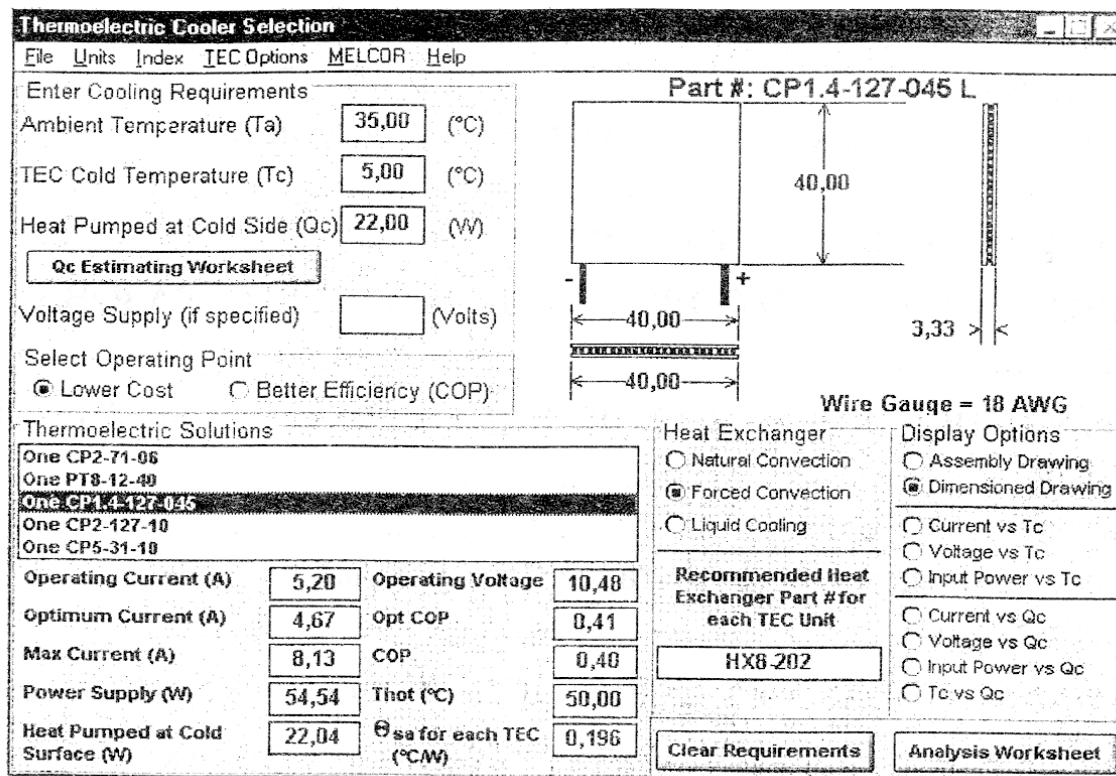


Рис. 16. Результаты работы программы по выбору модуля

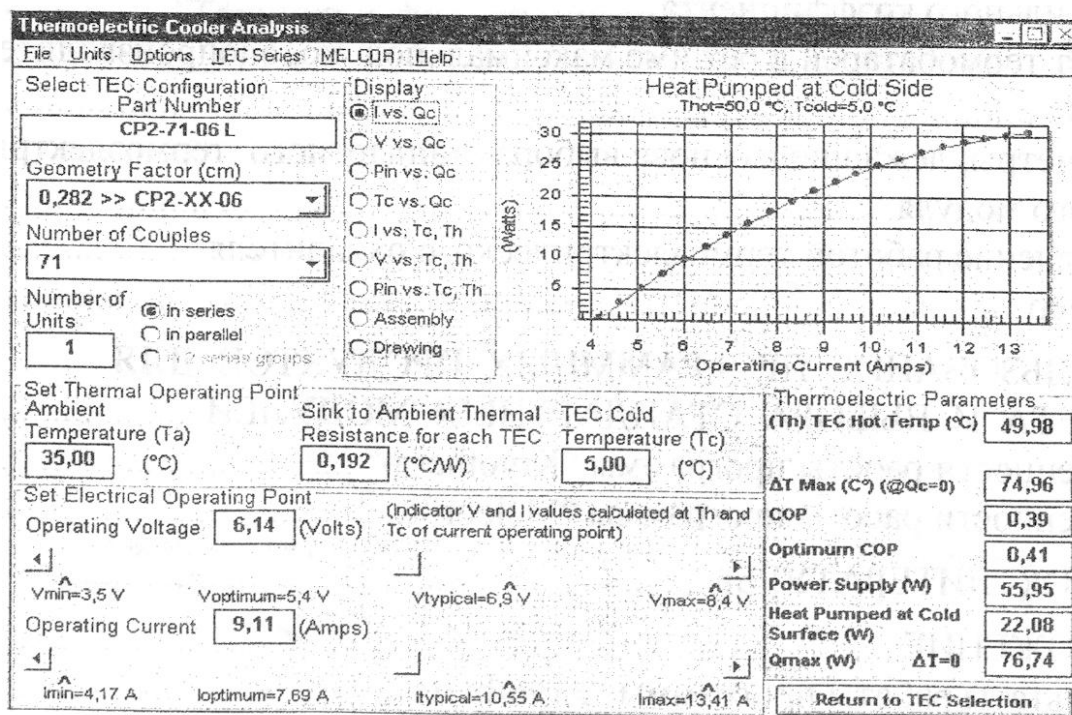


Рис. 17. Рабочие характеристики выбранного модуля

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА ...	7
Виды проводимости термоэлектриков	7
Термоэлектрические эффекты	8
Термоэлектрический модуль.....	9
Основные расчетные соотношения для охлаждающего термоэлемента	11
Режимы работы охлаждающих термоэлементов	13
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	15
КОНСТРУКЦИОННОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ	18
Керамические материалы	18
Тепловое сопряжение термобатареи (модульный интерфейс).....	19
Теплообменники.....	20
ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ	20
РАСЧЁТ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ.....	22
Расчёт охлаждающей термобатареи в режиме максимального холодильного коэффициента	22
Расчёт термобатареи в режиме максимальной холодопроизводительности	24
Параметры, лежащие в основе выбора стандартного термоэлектрического модуля	24
Управление работой термоэлектрического охладителя	26
Пример.....	27
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ РАСЧЁТА И ВЫБОРА СТАНДАРТНЫХ МОДУЛЕЙ.....	28
Особенности работы программы “Kryotherm”	33
Особенности работы программы “Melcor”	35
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	37
ПРИЛОЖЕНИЕ	38
Результаты работы программы “Kryotherm”.....	38
Результаты работы программы “Melcor”.....	41

Булат Лев Петрович
Бужин Евгений Викторович

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ОХЛАЖДАЮЩИЕ
УСТРОЙСТВА**

**Методические указания
для студентов специальности 070200
“Техника и физика низких температур”**

Редактор Л.С. Лаврентьева
Корректор Н.И. Михайлова

ЛР № 020414 от 12.02.97

Подписано в печать 27.09.2001. Формат 60×84 1/16. Бум. писчая
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,56. Печ. л. 2,75. Уч.-изд. л. 2,0
Тираж 300 экз. Заказ № С 50

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
ИПЦ СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9