

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ И ГЕНЕРАТОРА

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)» в качестве лабораторного практикума для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлениям: 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов, 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей, 13.03.03 Энергетическое машиностроение

САМАРА
Издательство СГАУ
2015

УДК 621.314 (075)
ББК 31.264.5я7
И 889

Авторы: *Белозерцев В.Н., Некрасова С.О., Сармин Д.В., Угланов Д.А., Шиманов А.А.*

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. В.Н. Илюхин
д-р техн. наук, проф. СГТУ А.А. Кудинов

И 889 Исследование основных характеристик термоэлектрического охладителя и генератора: лаб. практикум / [В.Н. Белозерцев и др.]. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 76 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1063-3

Приведены подробные теоретические сведения об основных принципах термоэлектрических преобразователей энергии. Описаны методы их экспериментального исследования. Приведены основные методики расчёта термоэлектрических охладителей и генераторов. Подробно описана последовательность действий при выполнении лабораторных работ.

Настоящий лабораторный практикум предназначен для студентов «Института двигателей энергетических установок» Самарского государственного аэрокосмического университета, а также для подготовки магистров по направлению 24.04.05 Двигатели летательных аппаратов, изучающих дисциплину «Бортовая энергетика», «Автономные системы энергоснабжения», специалистов по специальности 24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей, изучающих дисциплину «Теплогенераторы», «Системы охлаждения, кондиционирования и вентиляции энергетических установок», «Возобновляемые источники энергии», а также бакалавров по направлению подготовки 13.03.03 Энергетическое машиностроение.

Лабораторный практикум может быть использован при выполнении дипломных проектов студентами 4 – 6 курсов, а также инженерно-техническими научными работниками, занимающимися расчетом и проектированием бортовых энергетических установок аэрокосмического назначения.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей СГАУ.

УДК 621.314 (075)
ББК 31.264.5я7

ISBN 978-5-7883-1063-3

© СГАУ, 2015

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ	7
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА	14
2.1 Эффект Зеебека	14
2.2 Эффект Пельтье.....	18
2.3 Эффект Томсона.....	25
3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ.....	27
4. РАСЧЁТ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА.....	34
5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХОЛОДИЛЬНИКИ И ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ	40
6. РАСЧЁТ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ.....	51
7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ РАСЧЁТА И ВЫБОРА СТАНДАРТНЫХ МОДУЛЕЙ	55
8. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ	61
Лабораторная работа № 1. Исследование характеристик термоэлектрического генератора.....	63
Лабораторная работа № 2. Исследование характеристик термоэлектрического охладителя	66
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	72
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	73

ВВЕДЕНИЕ

Научная мысль обладает способностью опережать время. Открытия, сделанные учеными, позволяют будущим поколениям, руководствуясь ими, создавать улучшающие жизнь человека приборы и приспособления; находить новые способы защиты его здоровья и благополучия. И явление, открытое в 1834 году часовщиком Жаном-Шарлем Пельтье и названное позже «Эффектом Пельтье», не стало исключением. Поэтому эффект, имевший место в начале XIX века, актуален и сейчас.

Возможности его применения неограниченны. Множество лабораторий и исследовательских центров занимаются разработкой способов его применения, потому что открытие, сделанное французским учёным, позволяет сделать жизнь человека комфортной, красочной, а блага цивилизации – доступными широкому кругу потребителей.

Высокая надёжность и простота устройства термоэлектрических генераторов делают их применение предпочтительным в тех случаях, когда возможность работы без обслуживания более важна, чем его КПД. Поэтому термоэлектрические генераторы применяются:

1. В энергетических модулях космических кораблей, находящихся на удаленных от Солнца орбитах, где фотоэлектрические преобразователи уже неэффективны.

2. В надстроечных циклах стационарных электростанций (потенциально).

3. Как генераторы для нефтедобывающих станций (включая морские платформы).

4. Как источники электрической мощности для вентиляторов в системах обогрева жилых помещений при повреждении или аварии основного источника электрической энергии.

5. Как источники электроэнергии в автомобиле, которые позволяют утилизировать избыточное тепло двигателя.

6. Как источники электроэнергии, необходимой для открытия клапанов в топочных газонагревательных системах. После зажигания растопочного факела термоэлектрические генераторы начинают вырабатывать электроэнергию, которая подается на механизм открытия главного клапана подачи газа.

Тепло, необходимое для работы термоэлектрических генераторов, может быть получено от различных источников. Можно использовать тепло, образующееся в результате сжигания топлива, проте-

кания ядерных реакций; тепло, содержащееся в выхлопных газах автомобилей, и др.

Энергия распада радионуклидов может утилизироваться в системах энергообеспечения космических кораблей (табл. 1).

При длительных космических полётах используется энергия плутония – 238, который имеет большой период полураспада. Однако стоимость такого топлива оказывается чрезвычайно высокой: несколько миллионов долларов на один радиоизотопный термоэлектрический генератор (РТЭГ).

В наземных установках более предпочтителен стронций-90. Около 500 таких РТЭГ установлены в бывшем Советском Союзе для специальных целей на границе с Финляндией и Норвегией (Кольский полуостров).

Таблица 1 – Радионуклиды, используемые в радиоизотопных термоэлектрических генераторах

Элемент	Период полураспада, годы	Удельная тепловая мощность, кВт/кг	Удельная стоимость установки, долл./Вт
Цезий – 144	0,781	25	15
Кюрий – 242	0,445	120	495
Плутоний – 238	86,8	0,55	3000
Полоний – 210	0,378	141	570
Стронций – 90	28,0	0,93	250

Радиоизотопный термоэлектрический генератор был установлен на космическом аппарате «Галилео». В нем использовались оригинальные по тем временам полупроводники на основе селена. Характеристики этого РТЭГ представлены в табл. 2, где даны параметры устройства в начале полёта BOL (Beginning Of Life) и после завершения межпланетного перелёта EOM (End Of Missions). Нужно сказать, что РТЭГ мог бы работать еще много лет и после завершения межпланетного перелёта. В данном случае момент BOE соответствует 1000 ч, а EOM – 59000 ч (почти 7 лет) после установки радиоизотопного источника тепла.

Разность температур ΔT за время полета поддерживалась практически на постоянном уровне 700 К, термоэлектрическая эффективность за 7 лет работы уменьшилась несущественно.

Таблица 2 – Характеристики радиоизотопного термоэлектрического генератора, установленного на космическом аппарате «Галилео», отправленного к Юпитеру в 1981 г.

Показатель	Единица	BOL	EOM
Тепло, вырабатываемое изотопным источником	Вт	2460	2332
Тепло, поступающее на преобразователь	Вт	2251	2129
Тепло, поступающее на термоэлементы	Вт	2068	1951
Температура горячего спая	К	1133	1090
Температура холодного спая	К	433	410
Термоэлектрическая эффективность	%	11,1	10,8
Эффективность генератора	%	9,4	8,6
Выходная мощность	Вт	230	201
Масса	кг	41,7	41,7
Выходное напряжение	В	30	30
Удельная мощность	Вт/кг	5,52	4,82

Еще одним преимуществом РТЭГ является его чрезвычайно малая масса, особенно если учесть, что она включает в себя не только генератор, но и топливо, необходимое для многолетнего функционирования. Даже самый лёгкий из всех возможных бензиновых двигателей будет на порядки тяжелее величины РТЭГ. Двигатели самолетов могут иметь удельную мощность 1500 Вт/кг, но к их массе нужно добавить массу топлива и окислителя, необходимых для долговременной работы. Удельный расход топлива в бензиновых двигателях составляет около 0,2 кг/(л.с. · ч) На каждый килограмм топлива двигателю требуется примерно 3,1 кг кислорода. Таким образом, удельный расход топлива и окислителя в бензиновых двигателях составляет 0,8 кг/(л.с. · ч). Поскольку 200 Вт соответствуют 0,27 л.с., часовой расход топлива и окислителя в таком двигателе равен 0,22 кг. При длительности полета, составляющей 59000 ч, на борту должно находиться 14000 кг топлива и окислителя. Таким образом, только масса необходимого топлива и окислителя будет в 300 раз больше массы РТЭГ. Кроме того, в РТЭГ нет подвижных частей и механизмов, поэтому не требуется обслуживание. В то же время невозможно представить себе бензиновый двигатель, который мог бы работать на протяжении 7 лет без технического обслуживания и ремонта.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Работа термоэлектрического генератора (ТЭГ) (рис. 1.1) основана на явлении возникновения в замкнутой цепи, образованной двумя разнородными проводниками с разной температурой спаев, термоэлектродвижущей силы, вызывающей электрический ток в цепи.



Рис. 1.1 – Термоэлектрический генератор

Способность термопары генерировать напряжение при имеющей место разности температур на её концах можно использовать для создания тепловой машины, которая преобразует тепловую энергию непосредственно в электрическую. Эффективность такого преобразователя, как и любой тепловой машины, ограничена эффективностью цикла Карно и поэтому может быть представлена в форме:

$$\eta = (T_H - T_C)\eta^*/T_H,$$

где η^* зависит от геометрических параметров устройства, свойств материалов и от согласования генератора с нагрузкой.

Использование идеи термоэлектрического преобразования для производства электроэнергии стало возможным благодаря исследованиям отечественных ученых под руководством академика А.Ф. Иоффе, который в 1929 г. предложил применять в термоэлементах вместо металлических проводников полупроводниковые материалы, обладающие высокой термоэлектродвижущей силой – в 40–50 раз большей, чем в металлах (рис. 1.2).

Для металлов коэффициент Z очень мал и составляет 10^{-8} – 10^{-7} (1/К). Поэтому их используют только в измерительной технике (термопары).

Для некоторых полупроводников Z достигает $-0,001$ (1/К), что позволяет получить КПД – 10–15%.

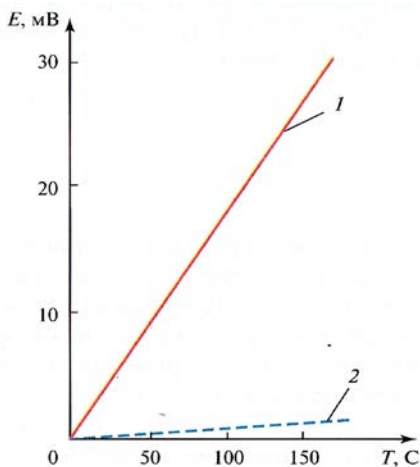


Рис. 1.2 – Сравнительные значения термо ЭДС в полупроводниковых материалах и в металлах в зависимости от разности температур горячего и холодного спаев: 1 – типичные полупроводники; 2 – типичные металлы

Основой любого термоэлектрического преобразователя являются термоэлектрические материалы. По интервалу рабочих температур они условно делятся на три группы:

- низкотемпературные материалы (0–300 °С). К ним относятся халькогениды висмута и сурьмы $\text{Bi}_2(\text{Te}, \text{Se})_3$ (n -тип) и $(\text{Sb}, \text{Bi})_2\text{Te}_3$ (p -тип);
- среднетемпературные материалы (300–600 °С). К ним относятся теллурид свинца PbTe (n - и p -тип), теллурид германия GeTe (p -тип) и теллурид олова SnTe (p -тип);
- высокотемпературные материалы (600 °С и выше). К ним относятся сплавы кремния с германием SiGe (n - и p -тип).

Схема простейшей термопары показана на рис. 1.3. Её электрическое сопротивление R и теплопроводность Λ можно выразить следующим образом:

$$R = l_A / (A_A \sigma_A) + l_B / (A_B \sigma_B),$$

$$\Lambda = A_A \lambda_A / l_A + A_B \lambda_B / l_B,$$

где A – площадь поперечного сечения каждого стержня; l – длина каждого стержня; σ – удельная электропроводность; λ – удельная теплопроводность. Заметим, что стержни в термопаре расположены параллельно на таком расстоянии, что тепловой поток распределён практически равномерно, а электрический ток проходит последовательно сначала через один стержень, а затем через другой.

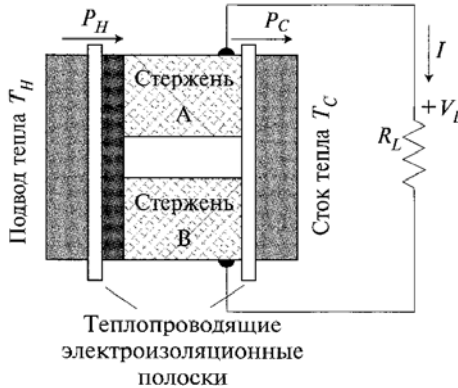


Рис. 1.3 – Термопара как термоэлектрический генератор

В случае, если через термопару протекает электрический ток I , мощность теплового потока, входящего в термопару от источника тепла, равна:

$$P_H = \Lambda(T_H - T_C) + \pi I - 1/2 RI^2.$$

Здесь π представляет собой коэффициент Пельтье, который в данном случае пропорционален температуре T_H . Таким образом:

$$P_H = \Lambda(T_H - T_C) + \alpha T_H I - 1/2 RI^2.$$

Ток, протекающий через нагрузку:

$$I = \frac{\alpha(T_H - T_C)}{R + R_L}$$

и, следовательно, мощность, выделяющаяся на нагрузке, можно представить как

$$P_L = \frac{\alpha^2 (T_H - T_C)^2 R_L}{(R + R_L)^2}.$$

Эффективность устройства:

$$\eta = P_L/P_H = (T_H - T_C)/T_H \left[\frac{(R+R_L)^2}{R_L} \frac{\Lambda}{\alpha^2 T_H} + \frac{1}{2} \frac{R}{R_L} + 1 + \frac{1}{2} \frac{R}{R_L} \frac{T_C}{T_H} \right]^{-1}.$$

Удобно выразить сопротивление нагрузки через сопротивление термопары $R_L = mR$. Тогда получим:

$$\eta = \eta_{Carnot} \left[1 + \frac{1}{2m} \left(1 + \frac{T_C}{T_H} \right) + \frac{(m+1)^2}{m} \frac{1}{T_H Z} \right]^{-1} = \eta_{Carnot} \eta^*,$$

где коэффициент добротности термопары Z определяется как:

$$Z \equiv \frac{\alpha^2}{\Lambda R},$$

где α – коэффициент Зеебека.

Коэффициент Z имеет размерность обратной температуры, поэтому в системе СИ измеряется в кельвинах в минус первой степени. В выражении для η^* все параметры, за исключением параметра Z , являются внешними. Внутренние характеристики термопары «спрятаны» в Z . Чем больше Z , тем больше эффективность термопары.

Для того, чтобы получить высокое значение добротности Z , необходимо выбирать материалы для термопары с большим значением коэффициента Зеебека. Желательно также, чтобы произведение ΛR было как можно меньше. Эта цель может быть достигнута путем выбора как соответствующего материала термопар, так и геометрических параметров устройства. Уменьшение длины и увеличение поперечного сечения стержня приведёт к снижению электрического сопротивления R , однако теплопроводность Λ при этом увеличится. Аналогично увеличение длины и уменьшение сечения приведет к уменьшению теплопроводности, но сопротивление при этом возрастёт. К счастью, можно выбрать геометрические параметры, при которых произведение ΛR минимально. Этот минимум будет иметь место, когда геометрия устройства удовлетворяет следующему выражению:

$$\frac{l_A A_B}{l_B A_A} = \sqrt{\frac{\lambda_A \sigma_A}{\lambda_B \sigma_B}}.$$

При этом условии

$$\Lambda R = \left[(\lambda_A / \sigma_A)^{\frac{1}{2}} + (\lambda_B / \sigma_B)^{\frac{1}{2}} \right]^2.$$

Максимальную эффективность термоэлектрического генератора можно получить при правильном выборе значения нагрузки R_L , которую мы выразили как $R_L = mR$. Отсюда следует, что необходимо подобрать соответствующее значение m :

$$\frac{d}{dm} \left[1 + \frac{1}{2m} \left(1 + \frac{T_C}{T_H} \right) + \frac{(m+1)^2}{m} \frac{1}{T_H Z} \right] = 0.$$

Откуда получим:

$$m = \sqrt{1 + \langle T \rangle Z},$$

где

$$\langle T \rangle = (T_H + T_C) / 2.$$

Подставив полученное значение m в уравнение для η^* , получим

$$\eta^* = \frac{(1 + \langle T \rangle Z)^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + \langle T \rangle Z)^{\frac{1}{2}} + T_C / T_H} = \frac{m - 1}{m + T_C / T_H}.$$

Суммируя все вышесказанное, можно прийти к заключению, что существуют три различных способа оптимизации эффективности термопары:

- 1) выбор материалов, обеспечивающих высокое значение добротности Z ;
- 2) выбор геометрических параметров, соответствующих минимальному значению произведения ΛR ;
- 3) выбор соответствующего сопротивления нагрузки по отношению к внутреннему сопротивлению устройства, т. е. выбор оптимального значения m .

Из предыдущего уравнения следует, что при $Z \rightarrow \infty$

$$\eta^* = \frac{1}{1 + \frac{1}{2m} \left(1 + \frac{T_C}{T_H} \right)}.$$

Максимальное значение η^* будет иметь место при $m = \infty$. Это означает, что сопротивление нагрузки должно быть бесконечно больше сопротивления самой термопары. Другими словами, сопротивление термопары должно быть равно нулю, чего можно добиться, только если в качестве материалов для термопары использовать сверхпроводники. К сожалению, сверхпроводники имеют практический нулевой коэффициент Зеебека. Следовательно, даже теоретиче-

ски нельзя получить эффективность $\eta^* = 1$. Даже с помощью новейших разработок в области материалов трудно добиться значения добротности Z больше $0,004 \text{ K}^{-1}$. Этим обстоятельством объясняется, почему эффективность термопар существенно меньше, чем термомеханических двигателей.

На рис. 1.4 представлена зависимость η^* от T_H (при $T_C = 300 \text{ K}$) для двух различных значений добротности Z .

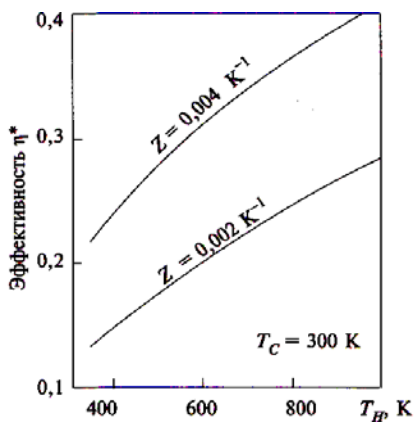


Рис. 1.4 – Эффективность термопары в зависимости от температуры

В каждом из представленных случаев t имеет оптимальное значение. Из этих графиков следует, что эффективность термопар, изготовленных по современным технологиям, может составлять (теоретически) около 30 % КПД цикла Карно. Современные тепловые электростанции имеют КПД на уровне 40 %. Если температура пара на входе в турбину равна 81 K , а температура на выходе – 311 K , то КПД цикла Карно составит 61,7 %. Это означает, что реализуется 64 % эффективности цикла Карно, что более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель в термоэлектрических генераторах.

Добротность материала

До этого момента мы применяли понятие добротности Z исключительно к паре материалов, из которых сделана термопара. Удобно использовать понятие добротности как характеристику отдельно взятого материала. Это поможет нам подобрать оптимальную пару материалов для термопары, но сначала необходимо расширить определение коэффициента Зеебека.

Измерения и теоретические расчеты показывают, что коэффициент Зеебека для любого спая сверхпроводников равен нулю. Это обстоятельство позволяет ввести понятие абсолютного коэффициента Зеебека для обычных проводников, определив его как значение коэффициента Зеебека для пары материалов, одним из которых является данный материал, а другим – сверхпроводник.

Естественно, что значение абсолютного коэффициента Зеебека может быть измерено для температур, при которых наблюдается эффект сверхпроводимости. Так, коэффициент Зеебека для свинца был измерен при температурах в диапазоне от 7,2 до 18 К. При температурах ниже 7,2 К свинец сам становится сверхпроводником и эффект Зеебека пропадает. Для температур выше 18 К на момент проведения экспериментов не существовало сверхпроводников.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА

При изучении работы термопары мы рассмотрели четыре основных механизма:

1. **Теплопроводность.** Это явление хорошо известно большинству читателей. Тепло может передаваться либо при движении носителей, либо при колебании кристаллической решётки. Теплопроводность «ответственна» за ухудшение коэффициента преобразования термопары.

2. **Джоулевы потери.** При протекании тока происходит выделение тепла, связанное с наличием электрического сопротивления. Этим явлением обусловлен второй механизм потерь в термопаре. Джоулевы потери возникают в результате рассеяния носителей заряда из-за несовершенства кристаллической решетки, которое обусловлено тепловыми вибрациями, наличием примесей, дислокаций и т.п.

3. **Эффект Зеебека.** Эффект проявляется в том, что в проводнике возникает электрическое напряжение, обусловленное наличием продольного градиента температур. Разность потенциалов является следствием того, что в холодной части проводника повышается концентрация носителей заряда. Описание механизма, объясняющего этот эффект, приведено в пункте 2.1.

4. **Эффект Пельтье.** Эффект проявляется в поглощении или выделении тепла в местах контакта различных проводников и обусловлен изменением теплоёмкости носителей при их переходе из одного материала в другой. Существует наличие связи между эффектами Зеебека и Пельтье. Здесь мы выведем приведённое ранее соотношение. Механизм эффекта Пельтье обсудим в пункте 2.2.

До сих пор полностью игнорировался ещё один, пятый, эффект, а именно эффект Томсона. Как будет показано ниже, на то были веские основания. Кроме того, в дальнейшем будет показана взаимосвязь эффектов Зеебека, Пельтье и Томсона.

5. **Эффект Томсона,** обусловленный тепловой конвекцией при дрейфовом движении носителей, будет подробно описан в пункте 2.3.

2.1 Эффект Зеебека

Рассмотрим трубку, заполненную газом и имеющую одинаковую по длине температуру. Давление и концентрация газа по длине также одинаковы. Если теперь один конец трубки нагреть, то повышение

давления газа в нагретой части приведёт к возникновению потока газа в сторону холодного конца трубки. В новом установившемся состоянии давление выровняется и перетекание газа прекратится. Согласно уравнению состояния для идеального газа $p = nkT$ и при постоянном давлении произведение nT постоянно. Отсюда следует: концентрация газа в холодном конце трубки будет больше, чем в горячем.

Электроны проводимости ведут себя так же, как газ. При наличии температурного градиента их концентрация у холодного конца проводника будет выше, чем у горячего, и, следовательно, холодный конец проводника по отношению к горячему будет заряжен отрицательно. Результирующая разность потенциалов называется напряжением (ЭДС) Зеебека. Значение этого напряжения зависит как от разности температур, так и от природы проводника. Если носителями зарядов в проводнике являются дырки, то более холодный конец будет положительно заряжен по отношению к горячему. По этой причине полярность напряжения Зеебека зависит от материала проводника.

Для того чтобы снять напряжение, возникающее в проводнике, необходимо внешнее соединение. Однако соединительный провод будет иметь тот же градиент температуры, что и основной проводник, а следовательно, в нём возникнет собственная ЭДС Зеебека. Если внешний соединительный провод сделан из того же материала, что и основной, то напряжения обоих проводников в точности компенсируют одно другое. В случае, если соединены проводники из различных материалов, возникнет некая результирующая разность потенциалов.

Термопара представляет собой соединение двух различных материалов, причём чаще всего соединяют материалы, имеющие противоположную полярность эффекта Зеебека, что приводит к сложению ЭДС Зеебека двух используемых материалов. Поскольку внешние соединительные провода подключаются к свободным концам термопары, которые обычно имеют одинаковую температуру, то дополнительного напряжения Зеебека за счёт соединительных проводов не возникает. Термопары обладают низким полным сопротивлением (небольшое напряжение и относительно большой ток) и в большинстве приложений соединяются последовательно, формируя термоэлектрическую батарею (рис. 2.1 и 2.2).

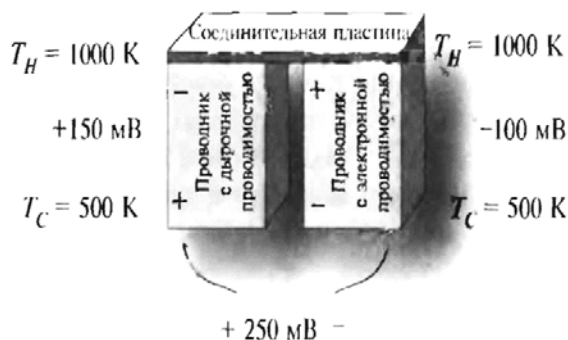


Рис. 2.1 – Термопара из двух материалов с проводимостью различного типа

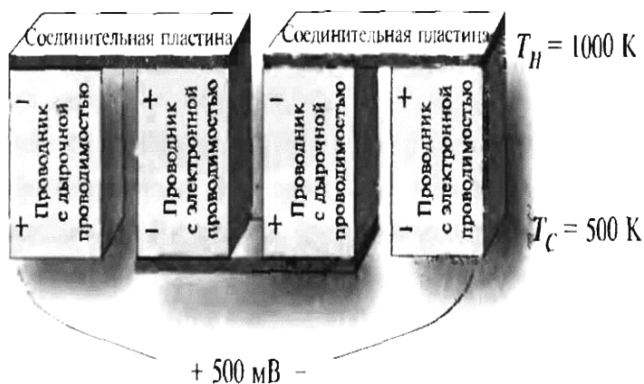


Рис. 2.2 – Термопары, соединённые последовательно в батарею

В термоэлектрических батареях индивидуальные элементы (термопары) электрически соединены последовательно, а в тепловом отношении – параллельно. В таком случае, если теплопроводность одного элемента равна Λ , то теплопроводность батареи, состоящая из n элементов, равна $n\Lambda$.

Аналогичным образом электрическое сопротивление батареи равно $n \cdot R$, если R – сопротивление одной ячейки. Разность потенциалов, генерируемая при разности температур в 1°C (эквивалент α

для одного элемента), в данном случае равна $n \cdot \alpha$. Следовательно добротность батареи, состоящей из одинаковых элементов,

$$Z = \frac{(n\alpha)^2}{nL \cdot nR} = \frac{\alpha^2}{LR}, \quad (2.1)$$

т. е. совпадает с добротностью одного элемента.

Представленное выше объяснение эффекта Зеебека сильно упрощено. Оно может рассматриваться как первое приближение, которое способствует пониманию принципа работы термоэлектрических устройств. Перемещение носителей к холодному концу проводника создаёт электрическое поле, которое, воздействуя на электроны, заставляет их дрейфовать в обратном направлении, т.е. к горячему концу проводника. Динамическое равновесие устанавливается тогда, когда число носителей, движущихся под действием градиента давления, будет в точности равно числу носителей, движущихся под действием электрического поля, т.е. в обратном направлении.

При динамическом равновесии нет переноса заряда от одного конца проводника к другому – поток $n\mathbf{v}$ одинаков в обоих направлениях. Однако носители, перемещающиеся из области с более высокой в область с более низкой температурой, обладают большей энергией и, следовательно, переносят больше тепла, чем носители, движущиеся в противоположном направлении. Таким образом, даже при отсутствии потока частиц в материале существует тепловой поток. Этим объясняется теплопроводность металлов.

Из этой простейшей модели следует, что в проводниках с электронной проводимостью термоэлектрическая ЭДС отрицательна, а коэффициент Зеебека меньше нуля (в соответствии с упомянутой выше договорённостью). В то же время полупроводники p -типа, в которых носителями заряда являются дырки, должны иметь положительный коэффициент Зеебека. Такая модель не совсем адекватна действительности. Несмотря на тот факт, что большинство металлов имеют отрицательный коэффициент Зеебека, для некоторых из них, в частности для меди, коэффициент Зеебека положителен. Для улучшения рассмотренной выше модели попытаемся учесть рассеяние электронов в процессе их движения в проводнике. Если сечение рассеяния не зависит от температуры, то сделанные выше выводы остаются в силе, поскольку оба потока (по температурному градиенту и

против него) возмущены одинаково. Однако если существует некий механизм, в результате действия которого более «горячие» электроны испытывают большее рассеяние, то это приведёт к снижению потока «горячих» электронов и, следовательно, к уменьшению значения отрицательной термоЭДС или даже перемене её знака. С другой стороны, если рассеяние сильнее для «холодных» электронов, то значение отрицательной термоЭДС возрастёт.

Для некоторых материалов наблюдается усиление эффекта Зеебека при понижении температуры. Такое поведение материалов является следствием электронфононного взаимодействия. В материалах с жёсткой кристаллической решёткой наличие температурного градиента приводит к возникновению волн колебаний решётки, которые ответственны за теплоперенос.

Такие волны могут интерпретироваться как поток квазичастиц, называемых фононами.

Здесь мы снова сталкиваемся с принципом дуализма в отношении понятий волна и частица. Фононы могут взаимодействовать с другими фононами и электронами. При высоких температурах фононфононное взаимодействие является доминирующим, тогда как при низких температурах имеет место электронфононное взаимодействие. В последнем случае поток фононов, движущихся от горячего конца к холодному, увлекает электроны, заставляя их перемещаться в том же направлении, что приводит к возрастанию отрицательного заряда на холодном конце проводника и соответствующему возрастанию значения отрицательной термоЭДС. Если же материал является полупроводником *p*-типа, то увлекаются дырки, что вызывает увеличение положительной термоЭДС.

2.2 Эффект Пельтье

Эффект Пельтье был открыт французом Жаном-Шарлем Пельтье в 1834 году. При проведении одного из экспериментов он пропускал электрический ток через полоску висмута с подключенными к ней медными проводниками (рис. 2.3). В ходе эксперимента он обнаружил, что одно соединение висмут-медь нагревается, другое – остывает.

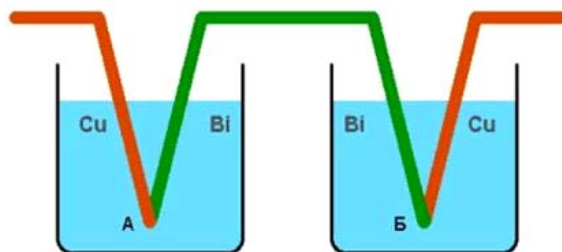


Рис. 2.3 – Схема опыта для измерения тепла Пельтье

Сам Пельтье не понимал в полной степени сущность открытого им явления. Истинный смысл явления был позже объяснен в 1838 г. Ленцем. В своём опыте Ленц экспериментировал с каплей воды, помещённой на стыке двух проводников (висмута и сурьмы). При пропускании тока в одном направлении капля воды замерзала, а при изменении направления тока – таяла. Тем самым было установлено, что при прохождении тока через контакт двух проводников в одном направлении тепло выделяется, в другом – поглощается. Данное явление было названо **эффектом Пельтье**.

2.2.1 Объяснение эффекта Пельтье

Тепло Пельтье пропорционально силе тока и может быть выражено формулой:

$$Q_{\text{п}} = \Pi \cdot q,$$

где q – заряд, прошедший через контакт; Π – так называемый коэффициент Пельтье, который зависит от природы контактирующих материалов и их температуры. Коэффициент Пельтье может быть выражен через коэффициент Томпсона

$$\Pi = \alpha T,$$

где α – коэффициент Томпсона, T – абсолютная температура.

Необходимо отметить, что коэффициент Пельтье находится в существенной зависимости от температуры. Некоторые значения коэффициента Пельтье для различных пар металлов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Значения коэффициента Пельтье для различных пар металлов

Железо-константан		Медь-никель		Свинец-константан	
Т, К	П, мВ	Т, К	П, мВ	Т, К	П, мВ
273	13,0	292	8,0	293	8,7
299	15,0	328	9,0	383	11,8
403	19,0	478	10,3	508	16,0
513	26,0	563	8,6	578	18,7
593	34,0	613	8,0	633	20,6

Величина выделяемого тепла Пельтье и его знак зависят от вида контактирующих веществ, силы тока и времени его прохождения, поэтому $Q_{\text{П}}$ может быть выражено еще одной формулой:

$$dQ_{\text{П}} = \Pi_{12} I C dt.$$

Здесь $\Pi_{12} = \Pi_1 - \Pi_2$ – коэффициент Пельтье для данного контакта, связанный с абсолютными коэффициентами Пельтье Π_1 и Π_2 контактирующих материалов. При этом считается, что ток идёт от первого образца ко второму. При выделении тепла Пельтье имеем: $Q_{\text{П}} > 0$, $\Pi_{12} > 0$, $\Pi_1 > \Pi_2$.

При поглощении тепла Пельтье оно считается отрицательным и соответственно: $Q_{\text{П}} < 0$, $\Pi_{12} < 0$, $\Pi_1 < \Pi_2$. Очевидно, что $\Pi_{12} = -\Pi_{21}$.

Размерность коэффициента Пельтье $[\Pi]$ СИ = Дж/Кл = В.

Классическая теория объясняет явление Пельтье тем, что при переносе электронов током из одного металла в другой они ускоряются или замедляются внутренней контактной разностью потенциалов между металлами. В случае ускорения кинетическая энергия электронов увеличивается, а затем выделяется в виде тепла. В обратном случае кинетическая энергия уменьшается и энергия пополняется за счёт энергии тепловых колебаний атомов второго проводника. Таким образом, он начинает охлаждаться. При более полном рассмотрении учитывается изменение не только потенциальной, но и полной энергии.

На рис. 2.4 и 2.5 изображена замкнутая цепь, составленная из двух различных полупроводников ПП₁ и ПП₂ с контактами А и В.

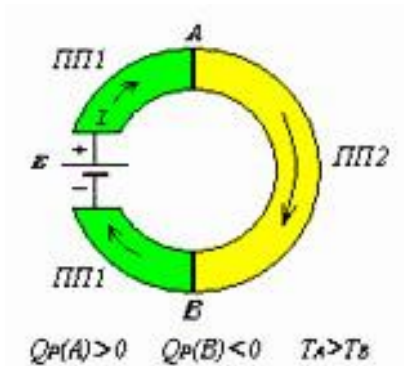


Рис. 2.4 – Выделение тепла Пельтье (контакт А)

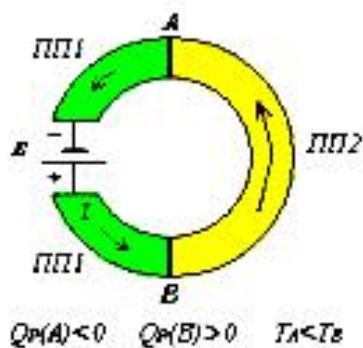


Рис. 2.5 – Поглощение тепла Пельтье (контакт А)

Такую цепь принято называть термоэлементом, а её ветви – термоэлектродами. Через цепь течет ток I , созданный внешним источником ε . Рис. 2.4 иллюстрирует ситуацию, когда на контакте А (ток течет от ПП₁ к ПП₂) происходит выделение тепла Пельтье $Q_{\text{п}}(A) > 0$, а на контакте В (ток направлен от ПП₂ к ПП₁) его поглощение: $Q_{\text{п}}(B) < 0$. В результате происходит изменение температур спаев: $T_A > T_B$.

На рис. 2.5 изменение знака источника меняет направление тока на противоположное: от ПП₂ к ПП₁ на контакте А и от ПП₁ к ПП₂ на контакте В. Соответственно меняется знак тепла Пельтье и соотношение между температурами контактов: $Q_{\text{п}}(A) < 0$, $T_A < T_B$.

Причина возникновения эффекта Пельтье на контакте полупроводников с одинаковым видом носителей тока (два полупроводника n -типа или два полупроводника p -типа) такая же, как и в случае контакта двух металлических проводников. Носители тока (электроны или дырки) по разные стороны спая имеют различную среднюю энергию, которая зависит от многих причин: энергетического спектра, концентрации, механизма рассеяния носителей заряда. Если носители, пройдя через спай, попадают в область с меньшей энергией, они передают избыток энергии кристаллической решётке, в результате чего вблизи контакта происходит выделение теплоты Пельтье ($Q_{\text{П}} > 0$) и температура контакта повышается. При этом на другом спае носители, переходя в область с большей энергией, заимствуют недостающую энергию от решётки, происходит поглощение теплоты Пельтье ($Q_{\text{П}} < 0$) и понижение температуры.

Эффект Пельтье, как и все термоэлектрические явления, выражен особенно сильно в цепях, составленных из электронных (n -тип) и дырочных (p -тип) полупроводников. В этом случае эффект Пельтье имеет другое объяснение. Рассмотрим ситуацию, когда ток в контакте идёт от дырочного полупроводника к электронному (p - n). При этом электроны и дырки движутся навстречу друг другу и, встретившись, рекомбинируют. В результате рекомбинации освобождается энергия, которая выделяется в виде тепла. Эта ситуация рассмотрена на рис. 2.6, где изображены энергетические зоны (ϵ_c – зона проводимости, ϵ_v – валентная зона) для примесных полупроводников с дырочной и электронной проводимостью.

На рис. 2.7 (ϵ_c – зона проводимости, ϵ_v – валентная зона) иллюстрируется поглощение тепла Пельтье для случая, когда ток идёт от n к p -полупроводнику (n – p).

Здесь электроны в электронном и дырки в дырочном полупроводниках движутся в противоположные стороны, уходя от границы раздела. Убыль носителей тока в пограничной области восполняется за счет попарного рождения электронов и дырок. На образование таких пар требуется энергия, которая поставляется тепловыми колебаниями атомов решетки. Образующиеся электроны и дырки увлекаются в противоположные стороны электрическим полем. Поэтому пока через контакт идет ток, непрерывно происходит рождение новых пар. В результате в контакте тепло будет поглощаться.

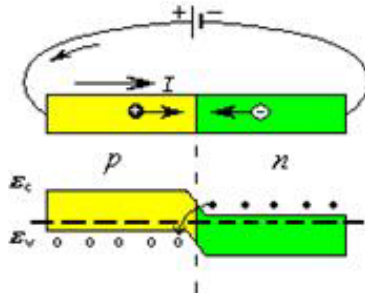


Рис. 2.6 – Выделение тепла Пельтье на контакте полупроводников р- и n-типа

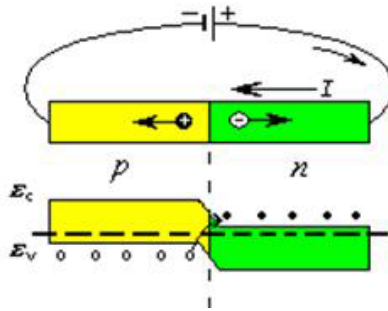


Рис. 2.7 – Поглощение тепла Пельтье на контакте полупроводников р- и n-типа

Применение полупроводников разных типов в термоэлектрических модулях представлено на рис. 2.8. Такая цепь позволяет создавать эффективные охлаждающие элементы.



Рис. 2.8 – Использование полупроводниковых структур в термоэлектрических модулях

Рассмотрим два различных проводника a и b с одинаковой площадью поперечного сечения A , которые соединены, как это показано на рис. 2.9. Поверхность S является контактной поверхностью проводников. Оба проводника имеют одинаковую температуру T и через них протекает электрический ток I . Пусть теплоемкость электронов в проводнике a равна c_a в проводнике b — c_b . Тогда тепловая энергия, которой обладает электрон, в каждом проводнике равна $c_a T$ и $c_b T$ соответственно. В случае, если электроны имеют максвелловское распределение по скоростям, то $c_a T = c_b T = \frac{3}{2} kT$.



Рис. 2.9 – Перенос тепла посредством электрического тока

Электрический ток, протекающий через контактную поверхность S , в каждом направлении

$$I = qnvA. \quad (2.2)$$

В проводнике a вместе с электрическим током в направлении контактной поверхности переносится поток тепловой энергии

$$P_a = nvAc_a T, \quad (2.3)$$

а в проводнике b от контактной поверхности уносится поток тепловой энергии

$$P_b = nvAc_b T. \quad (2.4)$$

Если $P_a > P_b$, то на поверхности контакта двух проводников тепловая энергия должна отводиться в окружающую среду и её поток будет равен

$$P = P_a - P_b = nvAT(c_a - c_b) = \frac{T}{q}(c_a - c_b) \cdot I \equiv \pi I. \quad (2.5)$$

Если электроны имеют максвелловское распределение по скоростям, то в рамках изложенной модели коэффициент Пельтье π будет равен нулю, поскольку в этом случае $c_a = c_b$. Однако, основываясь

на факте существования эффекта Пельтье, следует сделать вывод, что в материалах, используемых для изготовления термопар, электронный газ не подчиняется распределению Максвелла. Это заключение согласуется с общепринятым положением о немаксвелловском распределении электронов в металлах. Однако в слабо легированных полупроводниках электронная проводимость описывается на основе максвелловского распределения. Поэтому требуется дополнительное усовершенствование модели, чтобы объяснить наличие эффекта Пельтье в таких материалах.

2.3 Эффект Томсона

Рассмотрим одномерный газ. Теперь мы хотим вывести формулу для конвективного переноса тепла. На время пренебрежём эффектом теплопроводности, поскольку при желании его влияние можно просто наложить на результат, который будет получен.

Предположим, что имеется некий поток nv молекул и что температура не одинакова вдоль столба газа. Рассмотрим три соседние точки: 1, 2 и 3. Каждая молекула, которая движется из точки 1 в точку 2, переносит энергию, равную cT_1 . Здесь c – среднее значение теплоёмкости молекулы (т.е. $c = 1/N$ от теплоёмкости, которой обладают N молекул). Каждой молекуле, которая достигла точки 2, придя из точки 1, можно поставить в соответствие другую молекулу, которая покинула точку 2 и направляется к точке 3. Последняя будет переносить энергию cT_2 . Таким образом, увеличение энергии (джоули в секунду на единицу площади) в точке 2 вследствие потока газа составит $(T_1 - T_2)nv$.

Если расстояние между точками 1 и 2 бесконечно мало, то $T_1 - T_2 = cT$ и поток энергии ($\text{Вт}/\text{м}^2$)

$$dP^* = -cnvdT, \tag{2.6}$$

где P^* – плотность мощности. Если вместо столба газа мы рассмотрим проводник с электронной проводимостью, то тепло переносится электронами и, следовательно, $J = qnv$,

$$dP^* = -\frac{J}{q}cdT \tag{2.7}$$

или

$$dP^* = -\frac{1}{q}cdT. \tag{2.8}$$

Полученное выражение можно переписать как

$$dP = \tau IdT, \quad (2.9)$$

где τ – коэффициент Томсона, измеряемый в вольтах на кельвин.

Очевидно, что

$$\tau = -\frac{c}{q}. \quad (2.10)$$

Для проводников, в которых для носителей справедливо распределение Максвелла, $c = 3/2k$ и коэффициент Томсона

$$\tau = -\frac{3k}{2q} = -129 \text{ мкВ/К}. \quad (2.11)$$

Многие полупроводники должны иметь коэффициент Томсона на уровне – 100 мкВ/К. Однако для более точного расчёта этого коэффициента необходимо принимать во внимание влияние дырочной проводимости. Электроны в металлах не подчиняются максвелловской статистике. Как уже было сказано выше, они описываются статистикой Ферми-Дирака: только незначительное число электронов, находящихся в высокоэнергетическом хвосте распределения, может переносить тепло. Те из электронов, которые способны на это, переносят энергию порядка kT единиц, но их доля в общем числе электронов составляет только kT/W_F . Следовательно, грубо среднюю теплоемкость электронов можно оценить как

$$c = \frac{\partial}{\partial T} \cdot \left(\frac{kT}{W_F} kT \right) = \frac{2k^2T}{W_F}. \quad (2.12)$$

Отношение теплоёмкости по Ферми-Дираку к теплоёмкости по Максвеллу порядка kT/W_F .

При комнатной температуре kT соответствует 25 мэВ, в то время как характерное значение W_F составляет 2,5 эВ. Поэтому «квантовая» теплоёмкость приблизительно в 100 раз меньше «классической». Из этого следует, что коэффициент Томсона для металлов значительно меньше аналогичного коэффициента для полупроводников.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ПЕЛЬТЬЕ

Объединение большого количества пар полупроводников p - и n -типа позволяет создавать охлаждающие элементы – модули Пельтье сравнительно большой мощности. Структура полупроводникового термоэлектрического модуля Пельтье представлена на рис. 3.1.

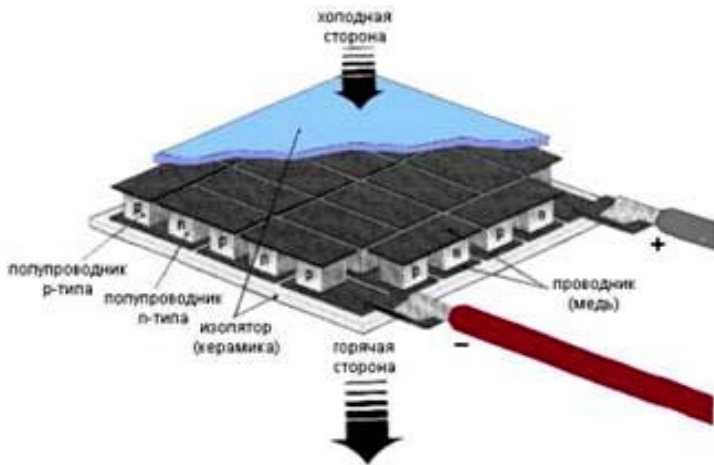


Рис. 3.1 – Структура модуля Пельтье

Модуль Пельтье представляет собой термоэлектрический холодильник, состоящий из последовательно соединённых полупроводников p - и n -типа, образующих p - n - и n - p -переходы. Каждый из таких переходов имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. В результате прохождения электрического тока определённой полярности образуется перепад температур между радиаторами модуля Пельтье: один радиатор работает как холодильник, другой радиатор нагревается и служит для отвода тепла. На рис. 3.2. представлен внешний вид типового модуля Пельтье.

Типичный модуль обеспечивает значительный температурный перепад, который составляет несколько десятков градусов. При соответствующем принудительном охлаждении нагревающегося радиатора второй радиатор – холодильник позволяет достичь отрицательных значений температур. Для увеличения разности температур возможно каскадное включение термоэлектрических модулей Пельтье при обеспечении их адекватного охлаждения. Это позволяет сравни-

тельно простыми средствами получить значительный перепад температур и обеспечить эффективное охлаждение защищаемых элементов. На рис. 3.3 представлен пример каскадного включения типовых модулей Пельтье.



Рис. 3.2 – Внешний вид модуля Пельтье

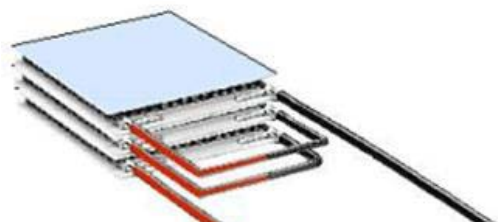


Рис. 3.3 – Пример каскадного включения модулей Пельтье

Устройства охлаждения на основе модулей Пельтье часто называют активными холодильниками Пельтье или просто кулерами Пельтье (рис.3.4).

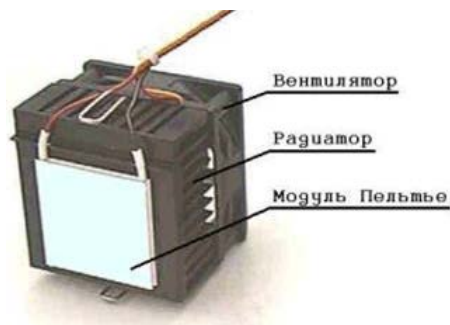


Рис. 3.4 – Внешний вид кулера с модулем Пельтье

Главная характеристика термоэлектрического охлаждающего устройства – это эффективность охлаждения:

$$Z = \alpha^2 / (r l),$$

где α – коэффициент термоЭДС;

r – удельное сопротивление;

l – удельная теплопроводность полупроводника.

Параметр Z – функция температуры и концентрации носителей заряда, причём для каждой заданной температуры существует оптимальное значение концентрации, при которой величина Z максимальна. Введение в полупроводник тех или иных примесей – основное доступное средство изменять его показатели (α , r , l) в желательную сторону.

Использование модулей Пельтье в активных кулерах делает их существенно более эффективными по сравнению со стандартными типами кулеров на основе традиционных радиаторов и вентиляторов. Однако в процессе конструирования и использования кулеров с модулями Пельтье необходимо учитывать ряд специфических особенностей, вытекающих из конструкции модулей, их принципа работы, архитектуры современных аппаратных средств компьютеров и функциональных возможностей системного и прикладного программного обеспечения.

Особенности эксплуатации модулей Пельтье

Пельтье, применяемые в составе средств охлаждения электронных элементов, отличаются сравнительно высокой надёжностью и, в отличие от холодильников, созданных по традиционной технологии, не имеют движущихся частей. И, как это отмечалось выше, для увеличения эффективности своей работы они допускают каскадное использование, что позволяет довести температуру корпусов защищаемых электронных элементов до отрицательных значений даже при их значительной мощности рассеяния. Также модуль является обратимым, т.е. при смене полярности постоянного тока горячая и холодная пластины меняются местами.

Однако кроме очевидных преимуществ модули Пельтье обладают и рядом специфических свойств и характеристик, которые необходимо учитывать при их использовании в составе охлаждающих средств. Некоторые из них были уже отмечены, но для корректного применения модули Пельтье требуют более детального рассмотрения.

К важнейшим характеристикам относятся следующие особенности эксплуатации:

– Модули Пельтье, выделяющие в процессе своей работы большое количество тепла, требуют наличия в составе кулера соответствующих радиаторов и вентиляторов, способных эффективно отводить избыточное тепло от охлаждающих модулей.

– Термоэлектрические модули отличаются относительно низким коэффициентом полезного действия (КПД) и, выполняя функции теплового насоса, сами являются мощными источниками тепла. Использование данных модулей в составе средств охлаждения электронных комплектующих компьютера вызывает значительный рост температуры внутри системного блока, что нередко требует дополнительных мер и средств для снижения температуры внутри корпуса компьютера. В противном случае повышенная температура внутри корпуса создает трудности для работы не только защищаемым элементам и их системам охлаждения, но и остальным компонентам компьютера.

– Модули Пельтье являются сравнительно мощной дополнительной нагрузкой для блока питания. Потребляемый ими ток превышает 6А. Слишком тонкие провода питания могут не выдержать такой силы тока. С учетом значения тока потребления модулей Пельтье величина мощности блока питания компьютера должна быть не менее 250 Вт.

– Модуль Пельтье, в случае выхода его из строя, изолирует охлаждаемый элемент от радиатора кулера. Это приводит к очень быстрому нарушению теплового режима защищаемого элемента и скорому выходу его из строя от последующего перегрева.

– Термоэлектрические модули соответствуют техническим данным в течение двух лет с даты изготовления при соблюдении потребителем условий хранения и эксплуатации. Срок хранения и эксплуатации – 15 лет с момента приемки. Из опыта известно, что если модуль не будет нагреваться до температуры плавления олова, он прослужит очень долго.

– Подаваемое на модуль напряжение определяется количеством пар ветвей в модуле. Наиболее распространенными являются 127-парные модули, величина максимального напряжения для которых составляет примерно 16 В. На эти модули обычно подаётся напряжение питания 12 В. Такой выбор напряжения питания в большинстве случаев является оптимальным и позволяет обеспечить, с одной сто-

роны, достаточную мощность охлаждения, а с другой стороны – достаточную экономичность. При повышении напряжения питания более 12 В увеличение холодильной мощности будет слабым, а потребляемая мощность будет резко увеличиваться. При понижении напряжения питания экономичность будет расти, холодильная мощность будет уменьшаться, но линейно, что очень удобно для организации плавного регулирования температуры. Для модулей с числом пар ветвей, отличным от 127, необходимо учитывать особенности конкретного устройства, прежде всего – условия теплоотвода с горячей стороны, и возможности источников питания.

Достоинства и недостатки

Достоинством элемента Пельтье являются небольшие размеры, отсутствие каких-либо движущихся частей, а также газов и жидкостей. При обращении направления тока возможно как охлаждение, так и нагревание – это даёт возможность термостатирования при температуре окружающей среды как выше, так и ниже температуры термостатирования. Также достоинством является отсутствие механических частей и шума.

Недостатком элемента Пельтье является более низкий коэффициент полезного действия, чем у компрессорных холодильных установок на фреоне, что ведёт к большой потребляемой мощности для достижения заметной разности температур. Несмотря на это, ведутся разработки по повышению теплового КПД, а элементы Пельтье нашли широкое применение в технике, так как без каких-либо дополнительных устройств можно реализовать температуры ниже 0 °С.

Основной проблемой в построении элементов Пельтье с высоким КПД является то, что свободные электроны в веществе являются одновременно переносчиками и электрического тока, и тепла. Материал для элемента Пельтье должен одновременно обладать двумя взаимоисключающими свойствами – хорошо проводить электрический ток, но плохо проводить тепло.

В батареях элементов Пельтье [1] возможно достижение теоретически очень большой разницы температур, в связи с этим лучше использовать импульсный метод регулирования температуры, благодаря которому можно снизить также потребление энергии. При этом желательно сглаживать пульсации тока для продления срока службы элемента Пельтье.

Применение эффекта Пельтье

Элементы Пельтье применяются в ситуациях, когда необходимо охлаждение с небольшой разницей температур или энергетическая эффективность охладителя не важна. Например, элементы Пельтье применяются в маленьких автомобильных холодильниках, так как применение компрессора в этом случае невозможно из-за ограниченных размеров и, кроме того, необходимая мощность охлаждения невелика.

Кроме того, элементы Пельтье применяются для охлаждения устройств с зарядовой связью в цифровых фотокамерах. За счёт этого достигается заметное уменьшение теплового шума при длительных экспозициях (например в астрофотографии). Многоступенчатые элементы Пельтье применяются для охлаждения приёмников излучения в инфракрасных сенсорах.

Также элементы Пельтье часто применяются:

для охлаждения и термостатирования диодных лазеров, чтобы стабилизировать длину волны излучения;

в компьютерной технике;

радиоэлектрических устройствах;

медицинском и фармацевтическом оборудовании;

бытовой технике;

климатическом оборудовании;

термостатах;

оптической аппаратуре;

для управления процессом кристаллизации;

как подогрев в целях отопления;

для охлаждения напитков;

в лабораторных и научных приборах;

лёдогенераторах;

кондиционерах;

для получения электроэнергии;

в электронных счётчиках расхода воды.

Конечно, охлаждающие устройства Пельтье вряд ли подходят для массового использования. Они достаточно дорогие и требуют пра-

вильного режима эксплуатации. Сегодня это, скорее, инструмент для любителей разгона процессоров. Однако в случае необходимости сильного охлаждения процессоров кулеры Пельтье являются наиболее эффективными устройствами.

Появились сообщения об экспериментах по встраиванию миниатюрных модулей Пельтье непосредственно в микросхемы процессоров для охлаждения их наиболее критичных структур. Такое решение способствует лучшему охлаждению за счёт снижения теплового сопротивления и позволяет значительно повысить рабочую частоту и производительность процессоров.

Работы в направлении совершенствования систем обеспечения оптимальных температурных режимов электронных элементов ведутся многими исследовательскими лабораториями. И системы охлаждения, предусматривающие использование термоэлектрических модулей Пельтье, считаются чрезвычайно перспективными.

4. РАСЧЁТ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Термоэлектрический генератор имеет выходную мощность 100 кВт при напряжении на выводах 115 В. Температура его горячей стенки 1500 К, а температура холодной – 1000 К. При такой достаточно высокой температуре холодной стенки термоэлектрический генератор может быть установлен на паросиловой установке в качестве надстройки к обычному тепловому циклу.

Характеристики материалов термопары следующие:

- коэффициент Зеебека (усреднённый по рабочему диапазону температур) – 0,0005 В/К;
- электрическое сопротивление ветви A – 0,002 Ом · см;
- электрическое сопротивление ветви B – 0,003 Ом · см;
- теплопроводность ветви A – 0,032 Вт/(см · К);
- теплопроводность ветви B – 0,021 Вт/(см · К);
- максимально возможная плотность электрического тока – 100 А/см².

Для простоты примем, что длина ветвей A и B одинакова (при этом площади их поперечного сечения могут быть разными).

Определить:

- 1) максимальную тепловую эффективность;
- 2) число последовательно соединённых термопар;
- 3) размеры каждой из ветвей термопары (A и B);
- 4) электродвижущую силу (ЭДС);
- 5) тепловую мощность на входе и выходе при полной (максимальной) нагрузке, без нагрузки.

Решение.

Обозначим ЭДС одной термопары через V_{oc} :

$$V_{oc} = \alpha \cdot (T_H - T_C) = 0.0005 \cdot (1500 - 1000) = 0,25 \text{ В.} \quad (4.1)$$

Пусть I – ток, проходящий через каждую термопару (он равен суммарному току, поскольку термопары соединены последовательно):

$$I = 1000000 \text{ Вт}/115 \text{ В} = 870 \text{ А.} \quad (4.2)$$

Если последовательно соединены n термопар, каждая из которых имеет сопротивление R , то

$$n \cdot V_{oc} - n \cdot R \cdot I = 115 \text{ В.} \quad (4.3)$$

Для того чтобы определить n , необходимо знать R . При максимальной эффективности нагрузка R_L должна быть равна $m \cdot R_{batt}$, или $R_L = m \cdot n \cdot R$, где $m = \sqrt{1 + \langle T \rangle \cdot Z}$. Здесь R – сопротивление одной термопары, а R_{batt} – сопротивление всей батареи последовательно соединённых термопар, которое равно $n \cdot R$.

В данном случае

$$R_L = 115 \text{ В} / 870 \text{ А} = 0,132 \text{ Ом}, \quad (4.4)$$

$$Z = \alpha^2 / (\lambda R), \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} \lambda R &= [\sqrt{\lambda_A \cdot \rho_A} + \sqrt{\lambda_B \cdot \rho_B}]^2 \\ &= [\sqrt{0.032 + 0.002} + \sqrt{0.021 + 0.003}] = 254 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}^2 / \text{К}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$Z = \frac{0.0005^2}{254 \cdot 10^{-6}} = 980 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}, \quad (4.7)$$

$$\langle T \rangle = \frac{1500 + 1000}{2} = 1250 \text{ К}, \quad (4.8)$$

$$m = \sqrt{1 + 980 \cdot 10^{-6} \cdot 1250} = 1,49, \quad (4.9)$$

$$nR = \frac{R_L}{m} = \frac{0.132}{1.49} = 0,0886 \text{ Ом}, \quad (4.10)$$

$$n = \frac{115 + nRI}{V_{oc}} = \frac{115 + 0,0886 \cdot 870}{0,25} = 768,3. \quad (4.11)$$

Таким образом, в батарее необходимо последовательно установить 768 термопар.

$$V_{oc} = \text{ЭДС батареи термопар} = n \cdot V_{oc} = 0,25 \cdot 768 = 192 \text{ В}, \quad (4.12)$$

$$P_{Hnoload} = \lambda_{batt} (T_H - T_C), \quad (4.13)$$

$\lambda_{batt} = n \cdot \lambda$, потому что, исходя из теплопередачи, термопары установлены параллельно.

$$\lambda = \frac{\lambda \cdot R}{R} = \frac{254 \cdot 10^{-6}}{0,0886 / 768} = 2,20 \text{ Вт} / \text{К}, \quad (4.14)$$

$$\lambda_{batt} = 768 \cdot 2,20 = 1690 \text{ Вт} / \text{К}, \quad (4.15)$$

$$P_{Hnoload} = 1690 \cdot (1500 - 1000) = 846 \text{ кВт}, \quad (4.16)$$

$$P_{Cnoload} = 846 \text{ кВт}, \quad (4.17)$$

$$P_{Hfullload} = 846 + n \cdot \alpha \cdot T_H \cdot I - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot n \cdot R = 846 + 768 \cdot \times \\ \times 0,0005 \cdot 1500 \cdot 870 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{2} \cdot 870^2 \cdot 0,0886 \cdot 10^{-3} = 1310 \text{ кВт}. \quad (4.18)$$

$$\eta = \frac{100}{P_H} = \frac{100}{1310} = 0,076, \quad (4.19)$$

$$P_{Cfullload} = P_H - 100 = 1300 - 100 = 1210 \text{ кВт}. \quad (4.20)$$

Поскольку длина ветвей в термопаре одинакова, то уравнение упрощается:

$$\frac{A_B}{A_A} = \sqrt{\frac{\lambda_A \cdot \rho_B}{\lambda_B \cdot \rho_A}} = \sqrt{\frac{0,032 \cdot 0,003}{0,021 \cdot 0,002}} = 1,51. \quad (4.21)$$

При $I_{max} = 100 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$ площадь меньшего из двух сечений A_A должна быть равна $\frac{870}{100} = 8,7 \text{ см}^2$.

Площадь большего сечения $A_B = 1,51 \cdot 8,7 = 13,1 \text{ см}^2$.

Электрическое сопротивление каждой термопары

$$R = \frac{n \cdot R}{n} = \frac{0,0886}{768} = 0,000115 \text{ Ом}.$$

$$0,000115 = \rho_A \cdot \frac{l}{A_A} + \rho_B \cdot \frac{l}{A_B} = \left(\frac{0,002}{8,7} + \frac{0,003}{13,2} \right) \cdot l, \quad (4.22)$$

откуда получаем $l = 0,36 \text{ см}$.

Если тепловой поток, выходящий из термоэлектрического генератора при температуре $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, направить затем в паровую турбину эффективностью 30 %, то электрическая мощность, генерируемая ею, будет равна $0,3 \cdot 1210 = 363 \text{ кВт}$. С учётом 100 кВт, которые мы получаем от термобатареи, суммарная вырабатываемая мощность составляет 463 кВт и эффективность преобразования

$$\eta = \frac{463}{1310} = 0,35. \quad (4.23)$$

Таким образом очевидно, что термоэлектрический генератор может быть использован как вполне приемлемый надстроечный цикл.

Метод регулярного режима

Принцип действия основан на определении количества энергии, поглощённой массой термоэлектрического генератора. В данном случае уравнение энергетического баланса будет выглядеть следующим образом:

$$W \cdot \tau = \Delta I_{\text{л}} + \Delta Q_{\text{окр.ср}} \quad (4.24)$$

где W – мощность нагревателя; τ – время нагрева термоэлектрического генератора; $\Delta I_{\text{л}}$ – изменение энтальпии термоэлектрического генератора за время нагрева τ ; $\Delta Q_{\text{окр.ср}}$ – суммарное тепло, отдаваемое термоэлектрическим генератором в окружающую среду за счёт естественной конвекции.

В свою очередь, изменение энтальпии термоэлектрического генератора за время нагрева τ определяется по формуле:

$$\Delta I_{\text{л}} = C_p \cdot m \cdot (T_{\text{л}} - T_{\text{л0}}), \quad (4.25)$$

где C_p – средняя теплоёмкость термоэлектрического генератора ($C_p = 338$ Дж/кг · К); m – масса его нагреваемой части; $T_{\text{л}}$ – температура нагрева термоэлектрического генератора через контрольный промежуток времени измерения; $T_{\text{л0}}$ – начальная температура термоэлектрического генератора.

Таким образом, первое слагаемое в формуле $\Delta I_{\text{л}}$ может быть определено по формуле (4.25). Второе слагаемое $\Delta Q_{\text{окр.ср}}$ в формуле (4.24), как уже было выше сказано, представляет собой суммарное тепло, отдаваемое термоэлектрическим генератором в окружающую среду за счёт естественной конвекции. Эта балансовая составляющая определялась по следующей формуле:

$$\Delta Q_{\text{окр.ср}} = \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_{\text{л}} - T_{\text{окр.ср}}) \cdot d\tau, \quad (4.26)$$

где α_{Σ} – общий коэффициент теплоотдачи; F – площадь нагревающей поверхности термоэлектрического генератора; $T_{\text{л}}$ – температура термоэлектрического генератора; $T_{\text{окр.ср}}$ – температура окружающей среды; $d\tau$ – элементарный промежуток времени нагрева термоэлектрического генератора.

Общий коэффициент теплоотдачи определяется экспериментально с применением метода регулярного режима при выключении нагревателя и охлаждения термоэлектрического генератора естественным образом. Сам эксперимент проводится сразу же после нагрева термоэлектрического генератора.

К телу, остывающему в изобарных условиях, применимо аналитическое выражение первого начала термодинамики в форме, которая устанавливает связь между теплотой и энтальпией:

$$dQ = -m \cdot di. \quad (4.27)$$

Выражение (4.27) справедливо для равновесных и неравновесных процессов. Как уже было сказано выше, для термоэлектрического генератора dQ в левой части выражается суммой:

$$dQ = dQ_{ест.конв.} + dQ_{отр.} + dQ_{изл.}, \quad (4.28)$$

где $dQ_{ест.конв.}$ – тепло, отдаваемое за счёт естественной конвекции; $dQ_{изл.}$ – тепло, отдаваемое за счёт лучистого теплообмена; $dQ_{отр.}$ – тепло, отдаваемое за счёт отражения части тепловой энергии. Для определения энтальпии di используем следующую формулу:

$$di = C_p \cdot dT. \quad (4.29)$$

Подставляя формулы (4.27), (4.29) в формулу (4.26), получаем:

$$-m \cdot C_p \cdot dT = \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_{Л} - T_{окр.ср}) \cdot d\tau. \quad (4.30)$$

Принимая $T_{Л} - T_{окр.ср} = v$ и из условия $T_{окр.ср} = \text{const}$ следует, что $dv = dT$.

С учётом дополнительных обозначений получаем форму дифференциального уравнения нестационарного теплообмена:

$$\frac{dv}{v} = -\frac{\alpha_{\Sigma} \cdot F}{C_p \cdot m} \cdot d\tau. \quad (4.31)$$

Введя обозначение

$$M = \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot F}{C_p \cdot m} \quad (4.32)$$

и интегрируя уравнение (4.32), получаем:

$$\ln v = -M \cdot \tau + \text{const}. \quad (4.33)$$

Из уравнения (4.32) следует, что логарифм натуральный избыточной температуры v является линейной функцией времени τ . При выводе уравнения (4.32) сделаны следующие допущения:

- температурное поле по всему объёму термоэлектрического генератора равномерно;

• $\alpha_{\Sigma} = \text{const}$, величина радиационного коэффициента теплоотдачи α_R , входящая в состав α_{Σ} , зависит как от ν , так и от абсолютных значений температур $T_{Л}$ и $T_{окр.ср}$. Поскольку α_R входит слагаемым в состав α_{Σ} и составляет от α_{Σ} величину порядка 5%, то полное изменение α_{Σ} за время измерения мощности излучения не превышает 0,5%.

В теории регулярного режима величина M именуется «темпом охлаждения». Любые исследования, связанные с применением регулярного режима, всегда сводятся к определению M . В данном случае по значению величины M соотношения (4.32) определяется α_{Σ} .

Эксперимент начинается сразу же после того, как термоэлектрический генератор нагрелся и отключён нагреватель и охладитель. Запускается секундомер и происходит замер температуры горячей и холодной сторон термоэлектрического генератора при его остывании. Измерения производятся через одну минуту в течение 5-10 мин. Находится значение избыточной температуры: $T_{Л} - T_{окр.ср} = \nu$, затем строится график $ln\nu = f(\tau)$. Через точки графика проводится осредняющая прямая. По её наклону определяется темп охлаждения:

$$M = \frac{ln\nu_1 - ln\nu_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (4.34)$$

Индексы 1 и 2 относятся к любым двум точкам, находящимся на осредняющей прямой. Суммарный коэффициент теплоотдачи определяется из уравнения (4.32):

$$\alpha_{\Sigma} = M \cdot \frac{C_P \cdot m}{F}. \quad (4.35)$$

Линейность функции $ln\nu = f(\tau)$ подтверждает наличие регулярного режима и, следовательно, правильность применения метода.

В данном случае $m = 0,155$ кг, $C_P = 385$ Дж/кг·К, $M \approx 10^{-3}$ с⁻¹, $F = 51$ см. Таким образом, зная α_{Σ} и все остальные параметры и характеристики, а также произведя замеры температуры термоэлектрического генератора $T_{Л}$ в течение времени его нагрева через определённые интервалы времени $\Delta\tau$ из формулы (4.24), преобразовав её в соответствии с формулами (4.25) и (4.26), получаем следующее выражение для мощности излучения:

$$W = \frac{C_P \cdot m \cdot (T_{Л2} - T_{Л1}) + \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (T_{Л2} - T_{окр.ср})}{\tau}. \quad (4.36)$$

5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХОЛОДИЛЬНИКИ И ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ

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

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

1. *Маломощные охладители ($Q_0 < 100 \text{ Вт}$)*. Подавляющее число термоэлектрических холодильников относятся именно к этому классу. С экономической точки зрения при таких мощностях они сравнимы с компрессионными машинами.

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

3. *Высокомощные охладители ($Q_0 > 500 \text{ Вт}$)*. 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 вертолётов с $Q_0 = 1 \text{ кВт}$.

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 самолётов и пассажирских железнодорожных вагонов.

Созданы термоэлектрические блоки для кондиционеров на поездах шведских и французских железных дорог. Проходят испытания термоэлектрические кондиционеры на российских железных дорогах. Представляются весьма перспективными автомобильные ло-

кальные 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.

Применение 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 зубоорудий, 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].

Эффект Пельтье обратим, поскольку направление теплового потока зависит от направления, протекающего через термопару тока. Тепловой поток может передаваться от холодной стороны термопары к горячей и, следовательно, термопара может работать как холодильник или тепловой насос. Как количество тепла может быть передано

в этом случае? Для упрощения задачи предположим, что α , R и Λ не зависят от температуры.

Пусть имеется некоторая батарея из термопар, для которой параметры α , R и Λ известны. Предположим, например, что $\alpha = 0,055 \frac{\text{В}}{\text{К}}$, $R = 4,2 \text{ Ом}$, $\Lambda = 0,25 \text{ Вт/К}$. Предположим также, что тепловой поток направлен от стенки с температурой $T_C = 278 \text{ К}$ к стенке с температурой $T_H = 338 \text{ К}$. В этом случае $\Delta T = 60 \text{ К}$.

Пусть P_C – тепловая мощность, отнимаемая от холодного резервуара,

$$P_C = -\Lambda \cdot \Delta T + \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2. \quad (5.1)$$

В данном случае

$$P_C = 15.0 + 15.29 \cdot I - 2.1 \cdot I^2. \quad (5.2)$$

Количество электрической энергии, требуемой для осуществления этого процесса:

$$P_C = \alpha \cdot \Delta \cdot T \cdot I + R \cdot I^2. \quad (5.3)$$

Отношение тепловой мощности, отбираемой от холодной стенки, к затраченной электрической мощности называется **коэффициентом преобразования теплового насоса** φ_C .

$$\varphi_C = \frac{-\Lambda \cdot \Delta T + \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} R \cdot I^2}{\alpha \cdot \Delta \cdot T \cdot I + R \cdot I^2}. \quad (5.4)$$

Для «идеальной» термопары ($R = 0$ и $\Lambda = 0$) и $\varphi_C = \frac{T_C}{\Delta T}$. Этот коэффициент называется эффективностью (КПД) цикла Карно для тепловых насосов φ_{Carnot} . В нашем случае $\varphi_{\text{Carnot}} = 4,63$. Реальная термопара имеет коэффициент преобразования гораздо более низкий, чем φ_{Carnot} .

На рис. 5.1 показана зависимость мощности P_C , отбираемой у холодного резервуара, от электрического тока, протекающего через термопару. В том случае, если $I < 0$ (не показано на рисунке), тепловой поток будет направлен в сторону холодного резервуара. При $I = 0$ (также не показано на рисунке) эффект Пельтье отсутствует и тепловой поток, обусловленный теплопроводностью, по-прежнему направлен в ту же сторону. При дальнейшем увеличении тока из-за эффекта Пельтье тепловой поток начинает уменьшаться и в какой-то момент (в устройстве, сконструированном должным образом), тепловой поток поменяет направление, т.е. тепло будет передаваться от холодной стенки к горячей. Вначале количество тепла, передаваемо-

го в этом направлении, будет расти с ростом тока I , но затем увеличение количества тепла, выделяемого в результате джоулева нагрева, приведёт к подавлению эффекта Пельтье и соответствующему уменьшению теплового потока, направленного от холодной стенки к горячей.

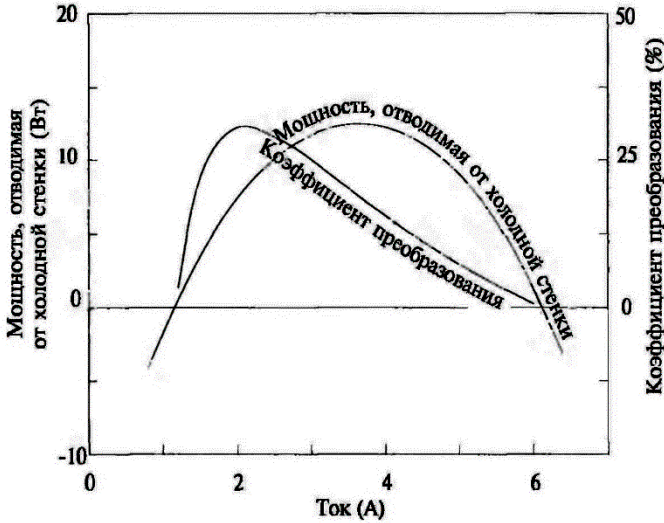


Рис. 5.1 – Зависимости тепловой мощности, передаваемой от холодной стенки к горячей, и коэффициента преобразования теплового насоса от величины электрического тока I

Легко вычислить ток, при котором тепловой поток P_C будет иметь максимальное значение:

$$\frac{\partial P_C}{\partial I} = \alpha T_C - RI = 0, \tag{5.5}$$

откуда

$$I_{max.cooling} = \alpha T_C / R, \tag{5.6}$$

при этом мощность теплового насоса

$$P_C max = -\Lambda \Delta T + \frac{\alpha^2 T_C^2}{2R}. \tag{5.7}$$

В нашем случае ток, соответствующий максимальной мощности, равен $3,64$ А, а сама максимальная мощность равна $12,83$ Вт.

Минимальная температура, которую можно достичь с помощью теплового насоса, соответствует температуре, при которой $P_{C\ max} = 0$:

$$\frac{\alpha^2 T_C^2}{2R} = \Lambda(T_H - T_C), \quad (5.8)$$

откуда

$$T_{C\ min} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2ZT_H}}{Z}, \quad (5.9)$$

$$Z = \alpha^2 / \Lambda R. \quad (5.10)$$

В нашем примере мы имеем $Z = 0.0028\ \text{K}^{-1}$ и $T_{C\ min} = 249\ \text{K}$. Ток, при котором получается минимальная температура, равен 3,26 А, при этом перекачиваемая мощность равна нулю. Таким образом, может быть достигнута любая температура выше 249 К.

Аналогичным образом можно вычислить значение тока, при котором будет иметь место максимальное значение коэффициента преобразования теплового насоса

$$\frac{\partial \varphi_C}{\partial I} = \left(-\Lambda \Delta T + \alpha T_C I - \frac{1}{2} R I^2 \right)^{-1} \cdot (\alpha \Delta T I + R I^2)^{-2} \cdot (\alpha \Delta T + 2 R I) + (\alpha \Delta T I + R I^2)^{-1} \cdot (\alpha T_C - R I) = 0, \quad (5.11)$$

отсюда получим

$$I = \frac{\Lambda \Delta T}{\alpha \langle T \rangle} \cdot (m + 1). \quad (5.12)$$

Это выражение может быть записано в виде

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R(m-1)}. \quad (5.13)$$

Подставляя выражение для I в уравнение (5.4) и проводя алгебраические преобразования, можно показать, что максимальное значение коэффициента преобразования термоэлектрического холодильника равно:

$$\varphi_{C\ opt} = \frac{T_C}{\Delta T} \left(\frac{m - T_H / T_C}{m + 1} \right), \quad (5.14)$$

где $m = \sqrt{1 + Z \langle T \rangle}$, а $\frac{T_C}{\Delta T}$, согласно данному выше определению, – эффективность цикла Карно для холодильника.

В данном случае имеем:

$$m = \sqrt{1 + Z < T >} = \sqrt{1 + 0,00288 \left(\frac{338+278}{2} \right)} = 1,374, \quad (5.15)$$

$$\varphi_{C \text{ opt}} = \frac{278}{338-278} \left(\frac{1,374-338/278}{1,374+1} \right) = 0,308. \quad (5.16)$$

При этом ток будет равен

$$I = \frac{\alpha \Delta T}{R(m-1)} = \frac{0,055(338-278)}{4,2(1,374-1)} = 2,10 \text{ А}. \quad (5.17)$$

В табл. 5.1 проводится сравнение двух батарей, изготовленных из идентичных термопар. Каждая из батарей отводит 100 Вт тепла от стенки с температурой от 258 к 323 К. Одна батарея работает с минимальным числом элементов, т.е. при токе, который соответствует максимальному значению P_C . Вторая батарея работает в режиме, при котором ток имеет значение, соответствующее максимальному значению коэффициента преобразования. Большая эффективность второй батареи достигается за счёт большего числа используемых элементов. Обычно характеристики термопар, используемых в качестве теплового насоса, представляют на графике, подобном изображённому на рис. 5.2, где приведена характеристика устройства из нашего примера, которая в определённой степени соответствует характеристике модуля Tellurex CZ1-1.0-127-1.27, представляющего собой батарею из 127 элементов, соединённых последовательно. Большое значение α , принятое выше, относится ко всему модулю и, следовательно, α одного элемента равно $\frac{0,055}{127} = 0,000433 \text{ В/К}$.

Таблица 5.1 – Характеристики устройства, работающего в режиме максимального теплового потока P_C и оптимального φ_C при $P_C = 100 \text{ Вт}$

Режим	Число ячеек	P_E , Вт	P_H , Вт	φ , %
Максимум P_C	100	540	640	18,5
Оптимум φ_C	161	336	436	29,7

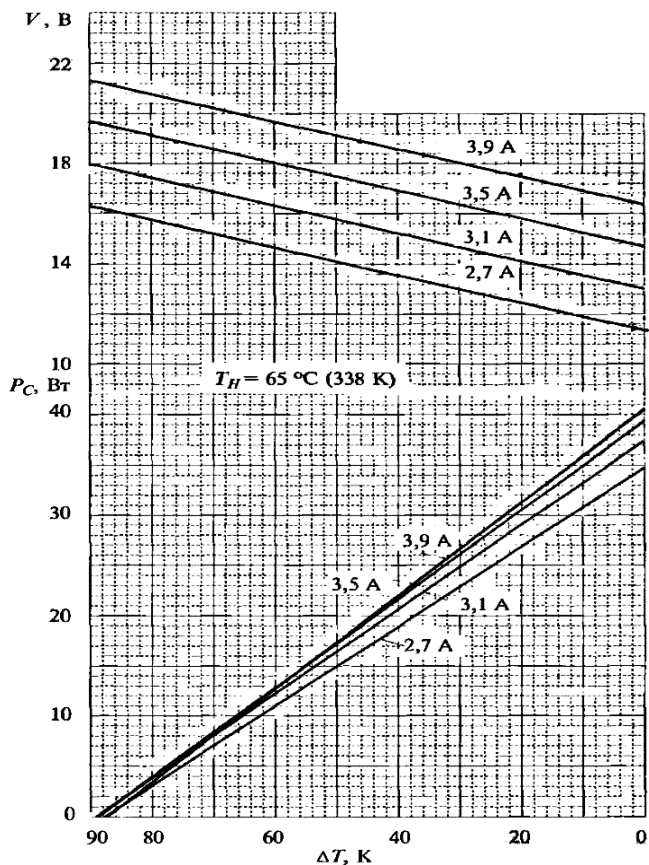


Рис. 5.2 – Типичные характеристики элемента Пельтье

Основные расчетные соотношения для охлаждающего термоэлемента

Рассмотрим работу термоэлемента, состоящего из двух полупроводниковых ветвей с электронной и дырочной проводимостями и из металлических контактных перемычек. 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]:

$$Q_{\Gamma} = P + Q_0. \quad (5.18)$$

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

$$A = Q_{\Gamma} - Q_x = \alpha \cdot T_{\Gamma} \cdot I - \alpha \cdot T_x \cdot I = \alpha \cdot I \cdot (T_{\Gamma} - T_x), \quad (5.19)$$

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

$$\varepsilon = \frac{Q_x}{A} = \frac{\alpha \cdot T_x \cdot I}{\alpha \cdot I \cdot (T_{\Gamma} - T_x)} = \frac{T_x}{T_{\Gamma} - T_x}. \quad (5.20)$$

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

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

Джоулевы потери определяются соотношением:

$$Q_{дж} = I^2 \cdot R, \quad (5.21)$$

где R – сопротивление ветвей термоэлемента.

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

Теплота, переходящая от горячего спаю к холодному

$$Q_m = \lambda \cdot (T_{\Gamma} - T_x), \quad (5.22)$$

где λ – средний удельный коэффициент теплопроводности ветвей термоэлемента.

Таким образом, холодопроизводительность термоэлемента с учётом потерь определится из выражения

$$Q_0 = \alpha \cdot T_x \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot (T_r - T_x). \quad (5.23)$$

Теплота, отводимая от горячего спая,

$$Q = \alpha \cdot T_r \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot (T_r - T_x). \quad (5.24)$$

Реальная работа цикла с учетом потерь

$$A_{ц,д} = Q - Q_0 = \alpha \cdot I \cdot (T_r - T_x). \quad (5.25)$$

Холодильный коэффициент реального цикла термоэлектрической холодильной машины

$$\varepsilon_{д} = \frac{\alpha \cdot T_x \cdot I - 0,5 \cdot I^2 \cdot R - \lambda \cdot (T_r - T_x)}{I^2 \cdot R + \alpha \cdot I \cdot (T_r - T_x)}. \quad (5.26)$$

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

$$I = \frac{\alpha \cdot (T_r - T_x)}{R \cdot \left[\sqrt{1 + 0,5 \cdot Z \cdot (T_r - T_x)} - 1 \right]}. \quad (5.27)$$

Материалы для термоэлектрических преобразователей (термоэлектрики) характеризуются добротностью Z . Данный параметр определяется физическими свойствами термоэлектрика – электропроводностью σ , теплопроводностью k и коэффициентом термоЭДС α , связанными формулой

$$Z = \sigma \cdot \alpha^2 / k. \quad (5.28)$$

Введем вспомогательный коэффициент M :

$$M = 1 + 0,5 \cdot Z \cdot (T_r - T_x) - 1.$$

Тогда, подставляя (2.10) в (2.9), получаем

$$\varepsilon_{max} = \frac{T_x}{T_r - T_x} \cdot \frac{M - \frac{T_r}{T_x}}{M + 1}. \quad (5.29)$$

Важно отметить, что холодильный коэффициент зависит от разности температур $(T_r - T_x)$, создаваемой термоэлектрической батареей, и величины Z , характеризующей свойства термоэлектрика. Холо-

дильный коэффициент стремится к своему максимальному значению 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 отведённого тепла в единицу времени.

В условиях **максимальной холодопроизводительности** холодильный коэффициент можно представить в виде

$$\varepsilon_{max} = \frac{1}{2T_r} \cdot \left(T_x - \frac{2 \cdot (T_r - T_x)}{Z \cdot T_x} \right). \quad (5.30)$$

Режимы, близкие к максимальной холодопроизводительности, используются в маломощных системах, в которых экономия электроэнергии не является важным фактором. Напротив, в достаточно мощных устройствах целесообразно 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. 5.3 и 5.4 представлены типичные графические зависимости холодильного коэффициента и холодопроизводительности от

перепада температур на термоэлементе для случаев режима максимального холодильного коэффициента и максимальной холодопроизводительности [5].

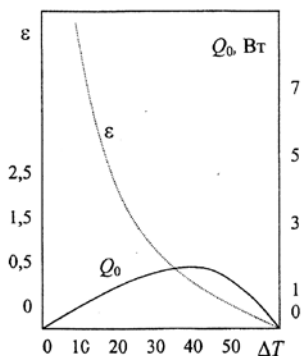


Рис. 5.3 – Зависимость холодильного коэффициента ϵ и холодопроизводительности Q_0 от разности температур для режима максимального холодильного коэффициента

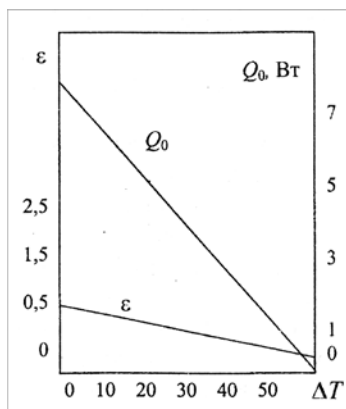


Рис. 5.4 – Зависимость холодильного коэффициента ϵ и холодопроизводительности Q_0 от разности температур для режима максимальной холодопроизводительности

6. 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.

Режим максимального холодильного коэффициента в практических целях используется достаточно редко.

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

Расчёт охлаждающей 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. 6.1 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 $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-3}$ В/К; коэффициент электропроводности $\sigma = 8 \cdot 10^4$ Ом⁻¹ · м⁻¹; требуемая холодопроизводительность $Q_0 = 20$ Вт; условия эксплуатации $T_x = 280$ К, $T_r = 310$ К.

Таблица 6.1– Результаты расчёта термобатареи

№ п/п	Определяемая величина	Расчётная формула	Результат расчёта
1	Оптимальный ток $I_{\text{опт}}$, А	$I_{\text{опт}} = \alpha \cdot T_x \cdot \sigma \cdot S / 2 \cdot l$	5,7
2	Падение напряжения U_0 , В	$U_0 = \alpha \cdot T_r$	0,115
3	Холодильный коэффициент ε_d	$\varepsilon_d = \frac{1}{2T_r} \cdot (T_x - \frac{2 \cdot (T_r - T_x)}{Z \cdot T_x})$	0,96
4	Сопротивление термопары R_0 , Ом	$R_0 = 2 \cdot l / \sigma \cdot S$	0,0182
5	Холодопроизводительность термопары Q^* , Ом	$Q^* = \frac{\alpha}{R_0} \cdot (\frac{T_x^2}{2} - \frac{T_r - T_x}{Z})$	0,22
6	Число термопар N	$N = Q_0 / Q^*$	91
7	Мощность, затрачиваемая одной термопарой	$P_0 = Q_0 / \varepsilon_d$	0,76
8	Мощность источника питания P_0 , Вт	$P = P_0 \cdot N$	69,16
9	Теплота горячих спаев Q_r , Вт	$Q_r = P + Q_0$	89
10	Напряжение источника питания U_n , В	$U_n = U_0 \cdot N$	10,5

Выбор стандартного термоэлектрического модуля для конкретного применения основывается, по крайней мере, на трёх параметрах [9].

Ими являются температуры горячей T_r и холодной T_x 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

$$T_{\Gamma} = T_{\text{окр}} + R_{\Gamma} \cdot Q_{\Gamma}, \quad (6.1)$$

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

$$Q_{\Gamma} = P + Q_0, \quad (6.2)$$

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 $^{\circ}\text{C}$;
- вынужденная конвекция – от 10 до 15 $^{\circ}\text{C}$;
- жидкостное охлаждение – от 2 до 5 $^{\circ}\text{C}$ (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_x должна быть ниже температуры охлаждаемого объекта $T_{\text{об}}$, особенно если он не находится с ней в непосредственном тепловом контакте:

$$T_x = T_{\text{об}} - R_x \cdot Q_0. \quad (6.3)$$

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:

$$Q = i \cdot G, \quad (6.4)$$

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 $I^2 \cdot R$ поступает на холодную сторону, а половина – на горячую);

– теплоприток через слой теплоизоляции

$$Q_{\text{прит}} = \lambda \cdot \Delta T \cdot S / \delta, \quad (6.5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/м·К;

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 $Q_0 = 0$.

7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ РАСЧЁТА И ВЫБОРА СТАНДАРТНЫХ МОДУЛЕЙ

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.

С помощью программы «Kryotherm» осуществим 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 дает рекомендации каса-

тельно того, какую величину теплового сопротивления должен иметь радиатор на горячей стороне термоэлектрических модулей и каким образом можно выбрать из каталогов подходящий радиатор.

Программа производит подбор наиболее подходящих модулей для разрабатываемой термоэлектрической системы охлаждения. Для такого 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.

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 .

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.

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.

Довольно часто возникает необходимость охлаждения объекта до определенной температуры за какое-то время, т. е. речь идёт 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 теплоёмкость. Для наиболее распространенных материалов программа приводит список данных характеристик.

В результате расчёта 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 потребуется 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 расчёта приводится величина теплового сопротивления между объектом и окружающей средой R_{ins} , а также внутренний объем параллелепипеда или цилиндра.

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

ства 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, 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.

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} .

Для достижения заданных величин основных параметров необходимо выполнить проектирование многокаскадного термоэлектрического модуля.

Многокаскадные модули применяются в системах глубокого охлаждения, холодильниках с большим перепадом температур, системах охлаждения научных, исследовательских и специальных приборов, также используются для охлаждения ИК-приемников, детекторов рентгеновского излучения и других датчиков.

Для верхних каскадов многокаскадных модулей используется оптимизированный термоэлектрический материал, который позволяет получать большую величину ΔT при меньшем количестве каскадов. Это позволяет производить многокаскадные модули с оптимальными весогабаритными характеристиками и низким энергопотреблением.

Выбор стандартного термоэлектрического модуля для конкретного применения основывается, по крайней мере, на трёх параметрах. Ими являются температуры горячей T_r и холодной T_x сторон модуля, а также тепловая нагрузка Q_0 , которую следует отводить от холодной стороны.

В качестве опытного образца было решено использовать модуль ТВ-4-(83-18-4-1)-1,3 (рис. 7.1) российской компании «Kryotherm». Схема приведена на рис. 7.2. Этот модуль способен обеспечить разницу температур $\Delta T_{\max}=138$ К при следующих параметрах:

$$I_{\max} = 3,7 \text{ А}; U_{\max} = 10 \text{ В}; R_{\text{ac}} = 2,37 \text{ Ом}; Q_{\max} = 0,8 \text{ Вт}.$$

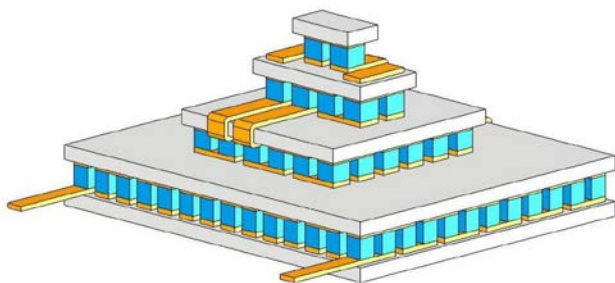


Рис. 7.1 – Модуль ТВ-4-(83-18-4-1)-1,3

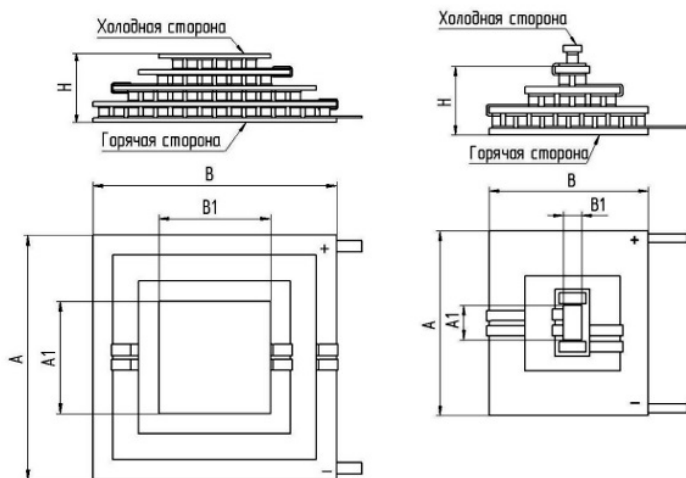


Рис. 7.2 – Схема модуля ТВ-4-(83-18-4-1)-1,3

Расчёт проводился в программе расчета характеристик термоэлектрических модулей и систем охлаждения «Kryotherm» (рис. 7.3).

Parameters...

I (A) =	1.87
U (V) =	5.00
W (W) =	9.36
Qc (W) =	0.00
Qh (W) =	9.36

Main result

COP = 0.000

Object temperature

Tobj (°C) = -142.3

Temperatures (°C)	Temperature differences (°C)
Th = -73.0	Th-Ta = 7.0
Ta = -80.0	Ta-Tob = 62.3
Tob = -142.3	Tob-Tc = 0.0
Tc = -142.3	Th-Tc = 69.3

Рис. 7.3 – Расчет характеристик термоэлектрических модулей и систем охлаждения в программе «Kryotherm»

Был осуществлен подбор оптимальных значений параметров ниже максимальных, условий охлаждения, изоляции и др. В результате, при наиболее оптимальном комплексе параметров удалось добиться снижения температуры – с 20°C до -142,3°C, то есть на 162,3°C. Таким образом, с помощью использования термоэлектрической системы охлаждения температура понизилась до 131 К.

8. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Конструктивная схема лабораторной установки приведена на рис. 8.1, она включает в себя: термоэлектрический генератор, измеритель-регулятор двухканальный ОВЕН 2ТФМ1, вольтметр, амперметр, реостат, нагреватель и радиатор с принудительным охладителем. Электрическая схема стенда приведена на рис. 8.2.

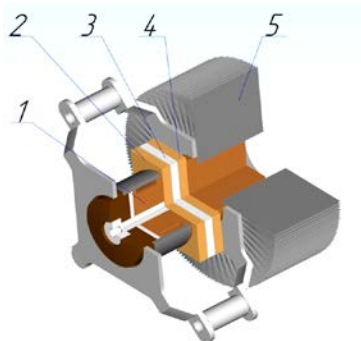


Рис. 8.1 – Принципиальная схема размещения элемента Пельтье:
1-нагреватель; 2 – горячая сторона; 3 – термоэлектрический генератор (охладитель); 4 – холодная сторона; 5 – радиатор

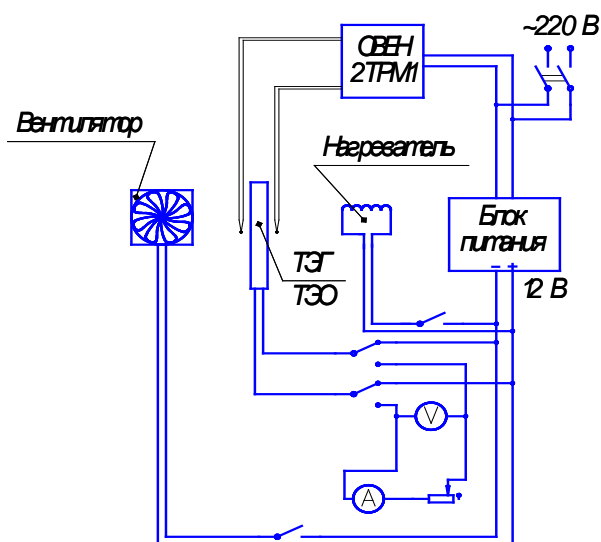


Рис. 8.2 – Принципиальная электрическая схема стенда

Основные характеристики установки:

- мощность вентилятора $P_{\text{вент}}=3,5$ Вт;
- объёмный расход воздуха вентилятором 37 CFM;
- частота вращения $n_{\text{вент}}=3100$ об/мин.



Рис. 8.3 – Положение переключателей для замера вольтамперной характеристики ТЭГ

Лабораторная работа № 1.
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Порядок проведения лабораторной работы

1. Включается общий выключатель питания установки. При этом записывается начальная температура горячей и холодной стороны термоэлектрического генератора (ТЭГ) с помощью двухканального измерителя «Овен 2ТРМ1».

2. Переводится переключатель ТЭГ в первое положение на режим термоэлектрического генератора.

3. Переключатели режимов мультиметров переводятся в положение, соответствующее рис. 5.3.

4. Включается питание мультиметров и нагревателя, при этом производится замер силы тока, напряжения и температур горячей и холодной сторон ТЭГ с установленной нагрузкой на ТЭГ 15 Ом и интервалом в 60 с, а после достижения температуры на горячей стороне 100⁰С включается питание охладителя. Далее следует повторный замер температур силы тока и напряжения до установления равновесного состояния ТЭГ. Мощность нагревателя в зависимости от температуры незначительно изменяется в связи с увеличением сопротивления нагревательной спирали.

5. Производится замер силы тока и напряжения ТЭГ на установленном режиме (при включённом охладителе радиатора). Для построения ВАХ ТЭГ с помощью реостата изменяется нагрузка от 0 до 34 Ом, при этом записываются показания вольтметра и амперметра для шести различных положений реостата (с одинаковым шагом), при этом также снимаются показания напряжения холостого хода и ток короткого замыкания ТЭГ.

6. Выключается питание нагревателя и охладителя после достижения равновесного состояния и также производится замер температуры горячей и холодной стороны ТЭГ с интервалом в 1 минуту 7 замеров.

Таблица 1 – Бланк регистрации экспериментальных данных

Показания приборов								
№	τ , мин	$t_x, ^\circ\text{C}$	$t_r, ^\circ\text{C}$	I , А	U , В	U_R , В	I_R , А	R , Ом
1								
...								

Таблица 2 – Бланк регистрации расчетных данных

Расчетные данные								
№	v , $^\circ\text{C}$	$\ln v$	M , мин ⁻¹	$\alpha\Sigma$, Вт/(м ² К)	$Q_{\text{окр.ср}}$, Вт	P , Вт	W , Вт	η
1								
...								

Обработка экспериментальных данных

1. Определить мощность нагревателя ТЭГ из зависимости, представленной в приложении:

$$P_H = f(\Delta T), \text{ Вт.}$$

2. Рассчитать мощность, вырабатываемую ТЭГ на установившемся режиме, при максимальной разности температур горячей и холодной сторон:

$$W = I_{\text{ТЭГ}} \times U_{\text{ТЭГ}}, \text{ Вт.}$$

3. Определить избыточную температуру $v = T_{\text{ТЭГ}} - T_{\text{окр.ср}}$.

4. Построить зависимость $\ln v = f(\tau)$.

5. Определить M и $\alpha\Sigma$ по формулам (4.34) и (4.35) соответственно.

6. Рассчитать мощность теплового потока, поступающего в окружающую среду от ТЭГ:

$$Q_{\text{окр.ср.}} = \alpha\Sigma \cdot F \cdot (t_{\text{ТЭГ.ср}} - t_{\text{окр.ср}}).$$

7. Определить КПД ТЭГ:

$$\eta = W / (P - Q_{\text{окр.ср.}}).$$

8. Рассчитать термоэлектрический генератор.

Исходные данные:

- выходная мощность 2 Вт;
- напряжение на выводах 3 В;
- температура его горячей стенки 400 К;
- температура холодной – 300 К.

Характеристики материалов термопары следующие:

- коэффициент Зеебека (усреднённый по рабочему диапазону температур) – 0,0007 В/К;
- электрическое сопротивление ветви A – 0,002 Ом·см;
- электрическое сопротивление ветви B – 0,003 Ом·см;
- теплопроводность ветви A – 0,04 Вт/(см·К);
- теплопроводность ветви B – 0,03 Вт/(см·К);
- максимально возможная плотность электрического тока – 15 А/см².

Определить:

- 1) максимальную тепловую эффективность;
- 2) число последовательно соединённых термопар в элементе ТЭГ;
- 3) размеры каждой из ветвей термопары (A и B);
- 4) электродвижущую силу (ЭДС);
- 5) тепловую мощность на входе и выходе при полной (максимальной) нагрузке, без нагрузки.

Содержание отчёта

1. Принципиальная схема установки.
2. Протокол записи показания измерительных приборов.
3. Обработанные результаты эксперимента.
4. Графики зависимости напряжения и силы тока ТЭГ на установленном режиме в зависимости от нагрузки $U_{ТЭГ} = f(I_{ТЭГ})$, мощности ТЭГ от температурного перепада между горячей и холодной стороной $P_{ТЭГ} = f(\Delta T_{ТЭГ})$.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ

Порядок проведения лабораторной работы

1. Включается общий выключатель питания установки. При этом записывается начальная температура горячей и холодной стороны термоэлектрического охладителя (ТЭО) с помощью двухканального измерителя «Овен 2ТРМ1».

2. Переводится переключатель ТЭГ во второе положение на режим термоэлектрического охладителя.

3. Включается питание охладителя и вентилятора радиатора ТЭО, производится замер температур горячей и холодной сторон ТЭО с интервалом в 2 минуты – до достижения равновесного состояния. Выключается питание ТЭО и вентилятора после достижения равновесного состояния и также производится замер температуры горячей и холодной стороны ТЭО: с интервалом в 30 секунд 6 замеров.

4. В случае появления на холодной стороне ТЭО капель влаги (конденсата) записывается температура точки росы t_p для определения по $i-d$ -диаграмме относительной влажности φ и влагосодержания d_v в окружающем воздухе. Мощность вентилятора охладителя принимается $P_{\text{вент}} = 4$ Вт, частота вращения $n_{\text{вент}} = 3100$ об/мин, объёмный расход воздуха в минуту вентилятором $Q_v = 37$ CFM; добротность материала $Z = 2,8 \cdot 10^{-3} K^{-1}$; коэффициент термоЭДС $\alpha = 3,7 \cdot 10^{-3} B/K$; источник питания $U_{\text{п}} = 12$ В; коэффициент электропроводности $\sigma = 8 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$.

Таблица 1 – Бланк регистрации экспериментальных данных

Показания приборов				
№	ТЭО включён		ТЭО выключен	
	$t_x, ^\circ\text{C}$	$t_r, ^\circ\text{C}$	$t_x, ^\circ\text{C}$	$t_r, ^\circ\text{C}$
1				
...				
12				

Таблица 2 – Бланк регистрации расчётных данных

Расчётные данные													
№	$v, \text{°C}$	$\ln v$	$M, \text{мин-1}$	$\alpha \Sigma, \text{Вт/(м2К)}$	$Q_{\text{окр.ср}}, \text{Вт}$	$P_{\text{ТЭО}}, \text{Вт}$	ϵ_{max}	$Q_0, \text{Вт}$	$Q_{\Gamma}, \text{Вт}$	$U_0, \text{В}$	$R_0, \text{Ом}$	$W, \text{Вт}$	φc
1													
...													

Обработка экспериментальных данных

1. Определить мощность охладителя в зависимости от разности температур между холодной и горячей стороной ТЭО (см. приложение).

$$P_{\text{ТЭО}} = f(\Delta T), \text{Вт.}$$

2. Рассчитать вспомогательный коэффициент M :

$$M = 1 + 0,5 \cdot Z \cdot (T_{\Gamma} - T_{\text{х}}) - 1.$$

3. Определить холодильный коэффициент

$$\epsilon_{\text{max}} = \frac{T_{\text{х}}}{T_{\Gamma} - T_{\text{х}}} \cdot \frac{M - T_{\Gamma}}{M + 1}.$$

4. Определить холодопроизводительность термоэлемента, Вт:

$$Q_0 = P_{\text{ТЭО}} \cdot \epsilon_{\text{max}};$$

– теплоту горячих спаев, Вт:

$$Q_{\Gamma} = P_{\text{ТЭО}} + q_0;$$

– падение напряжения, В:

$$U_0 = \frac{\alpha \cdot (T_{\Gamma} - T_{\text{х}}) \cdot M}{M - 1};$$

– число термопар N :

$$N = \frac{U_{\text{п.}}}{U_0};$$

– оптимальный ток, А:

$$I_{\text{опт}} = \frac{P}{U_{\text{п}}};$$

– сопротивление термобатареи, Ом:

$$R = \frac{\alpha \cdot (T_{\text{г}} - T_{\text{х}}) \cdot N}{I_{\text{опт}} \cdot \left[\sqrt{1 + 0.5 \cdot Z \cdot (T_{\text{г}} - T_{\text{х}})} - 1 \right]};$$

– сопротивление термопары, Ом:

$$R_0 = R/N.$$

5. Соотношение длины и сечения ветви:

$$\frac{l}{S} = y \cdot R_0/2;$$

– сечение ветви, мм²:

$$S = l/N.$$

6. Определить избыточную температуру:

$$\nu = T_{\text{тэо}} - T_{\text{окр.ср.}}$$

7. Построить зависимость $\ln \nu = f(\tau)$.

8. Определить M и $\alpha \Sigma$ по формулам (4.34) и (4.35) соответственно.

9. Рассчитать мощность теплового потока, поступающего от радиатора ТЭО к окружающей среде и от неё – к холодной стороне ТЭО:

$$Q_{\text{окр.ср.}} = \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (t_{\text{тэо.ср гор.ст.}} - t_{\text{окр.ср}}) \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{тэо}} = \alpha_{\Sigma} \cdot F \cdot (t_{\text{окр.ср}} - t_{\text{тэо.ср хол.ст.}}) \text{ Вт}.$$

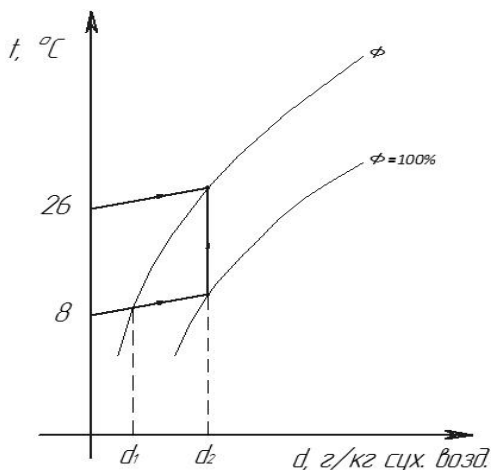
10. Рассчитать тепловую мощность, вырабатываемую ТЭО на установившемся режиме, при максимальной разности температур горячей и холодной стороны:

$$W = Q_{\text{окр.ср.}} + Q_{\text{тэо}} \text{ Вт}.$$

11. Определить КПД ТЭО:

$$\varphi_c = W / (P_{\text{ТЭО}} - Q_{\text{окр.ср.}}).$$

12. Определить влажность воздуха φ через точку росы (в случае её появления) по $i-d$ диаграмме влажного воздуха, представленной в приложении (пример изображён на рисунке).



Пример к определению влажности воздуха

13. Рассчитать количество влаги, выделившейся из воздуха на холодной стороне ТЭО:

$$D = d \cdot Q_B (\text{г/кг сух. возд.}).$$

14. Рассчитать термоэлектрический охладитель.

Исходные данные:

- выходная мощность 2 Вт;
- напряжение на выводах 12 В;
- температура горячей стенки (среднее значение, полученное из экспериментальных данных) К;
- температура холодной стенки (среднее значение, полученное из экспериментальных данных) К.

Характеристики материалов термопары следующие:

- длина термоэлемента $l = 4$ мм;
- сечение $S = 5.5$ мм²;
- добротность материала $Z = 2.8 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$;
- коэффициент термоЭДС $\alpha = 3.7 \cdot 10^{-3} \text{ В/К}$;
- коэффициент электропроводности $\sigma = 8 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$;
- требуемая холодопроизводительность $Q_0 = 2$ Вт;
- условия эксплуатации $T_x = \text{К}$, $T_r = \text{К}$ (максимальные полученные значения в ходе эксперимента при включённом ТЭО).

Определить:

- 1) число термоэлементов;
- 2) ток, проходящий через них;
- 3) напряжение источника питания;
- 4) потребляемую термобатареей мощность;
- 5) холодильный коэффициент.

Содержание отчета

1. Принципиальная схема установки.
2. Протокол записи показания измерительных приборов.
3. Обработанные результаты эксперимента.
4. Графики зависимости изменения температуры горячей и холодной стороны ТЭО до установившегося режима в зависимости от времени $\Delta T_{\text{ТЭО}} = f(\tau_{\text{ТЭО}})$.
5. Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое термоэлектрический генератор?
2. Применение элементов Пельтье.
3. Каковы особенности эксплуатации элементов Пельтье?
4. Принцип работы термоэлектрического генератора.
5. Способы оптимизации эффективности термопары.
6. На чем основывается эффект Пельтье?
7. Чем вызван эффект Зеебека?
8. Что такое эффект Томсона?
9. От чего зависит добротность материала и что это такое?
10. Назовите основные элементы лабораторной установки.
11. Группы интервалов рабочих температур термопар.
12. Достоинства элементов Пельтье.
13. Недостатки элементов Пельтье.
14. Допущения метода регулярного режима применительно к ТЭГ, ТЭО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После детального изучения эффекта Пельтье можно сделать вывод:

несмотря на то, что использование эффекта Пельтье требует дополнительных мер и исследований по изучению безопасного и рационального использования модулей Пельтье в качестве охлаждающих устройств, это явление считается перспективным и полезным для человека и цивилизации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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. Холодильные машины: учеб. для студентов вузов специальности «Техника и физика низких температур» / [А.В. Бараненко и др.]; под общ. ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 1997. – 992 с.
6. Handbook of Thermoelectric – London, N.Y.: CRC Press, 1995.
7. Anatyshuk 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. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие для вузов. В 10 т. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. – 4-е изд., стер.-М.: Физматлит, – 656 с.
11. Наркевич И.И., Вомлянский Э.И., Лобко С.И. Физика: учеб.– Минск: Новое знание, 2004. – 680 с.
12. Физика: Энциклопедия / под. ред. Ю.В. Прохорова // Большая Российская Энциклопедия, 2003. – 944 с.
13. Физическая энциклопедия. Т. 5. Стробоскопические приборы – яркость/ гл. ред. А.М. Прохоров; ред. кол.: Д.М. Балдин // Большая Российская Энциклопедия, 1998. – 760 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

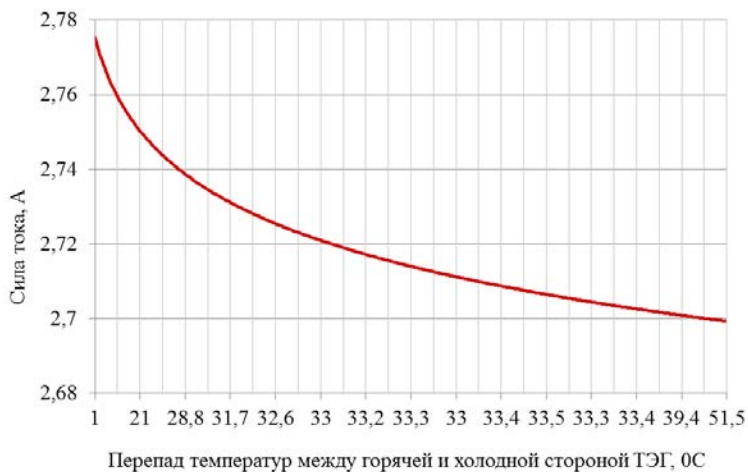


Рис. П1 – Зависимость силы тока в нагревательной спирали ТЭГ от разницы температур между его горячей и холодной сторонами при напряжении питания 11,85 В

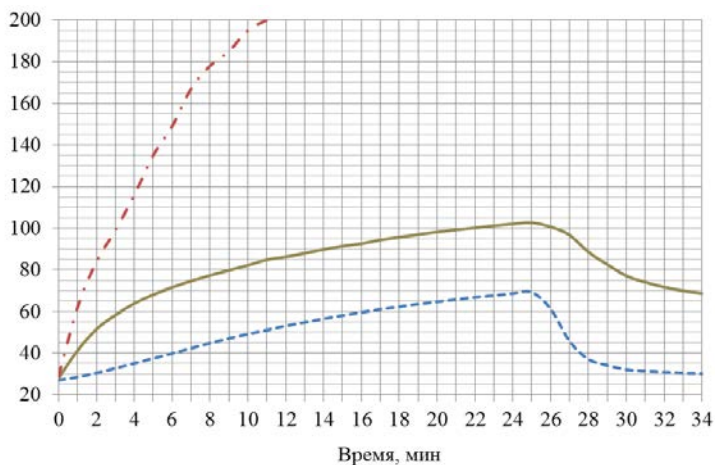


Рис. П2 – Зависимость температуры горячей стороны ТЭГ от времени нагрева с радиатором на холодной стороне и без него соответственно (после 25 минут нагрева включён охладитель радиатора): - - - - радиатор, ——— нагреватель с радиатором, - · - · - · нагреватель без радиатора



Рис. ПЗ – Зависимость мощности, потребляемой элементом Пельтье, от разницы температур между его горячей и холодной сторонами при напряжении питания 12 В

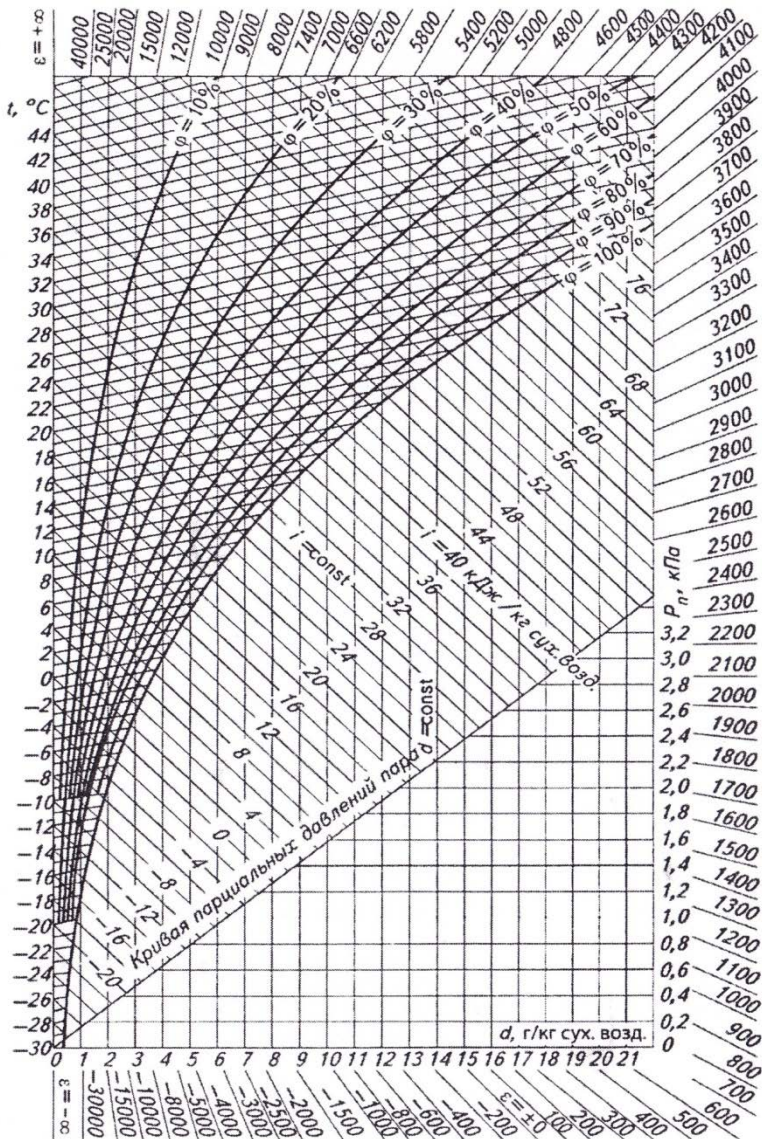


Рис. П4 – i - d диаграмма влажного воздуха ($P_0=760$ мм рт. ст.)

Учебное издание

*Белозерцев Виктор Николаевич,
Некрасова Светлана Олеговна,
Сармин Дмитрий Викторович,
Угланов Дмитрий Александрович,
Шиманов Артём Андреевич*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ОХЛАДИТЕЛЯ И ГЕНЕРАТОРА**

Лабораторный практикум

Редактор Н.С. Куприянова
Доверстка И.И. Спиридонова

Подписано в печать 29.12.2015. Формат 60 x 84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 4,75.
Тираж 50 экз. Заказ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет) (СГАУ)

443086 Самара, Московское шоссе, 34.
Изд-во СГАУ 443086 Самара, Московское шоссе, 34.

