

Санкт-Петербургский государственный университет  
Физический факультет  
Первая физическая лаборатория

---

Лабораторная работа № 137

## Исследование холодильника Пельтье



Санкт-Петербург  
2008 г.

139

## Исследование холодильника Пельтье

Эта работа рассчитана на 2 занятия. Первое занятие – измерения – проводится в лаборатории, второе занятие – обработка – в дисплейном классе, 2 этаж, комната 213.

## Термоэлектричество.

**Термоэлектрическими явлениями** называют физические явления, обусловленные взаимосвязью между тепловыми и электрическими процессами в твердых проводниках. К термоэлектрическим явлениям относятся эффект Зеебека, эффект Пельтье и эффект Томсона.

**Явление Зеебека** было открыто в 1821г Т.Зеебеком. Оно состоит в том, что в замкнутой электрической цепи, составленной из разных материалов, возникает электродвижущая сила, если места контактов поддерживаются при разных температурах. Электродвижущая сила равна

$$\varepsilon_T = \alpha(T_2 - T_1) \quad (1)$$

и называется **термоэлектродвижущей силой** (термоэдс). **Коэффициент термоэдс**  $\alpha$  зависит только от природы материалов, находящихся в электрическом контакте, и от температуры обоих контактов  $T_1$  и  $T_2$ .

**Явление Пельтье** было открыто французским физиком Ж.Пельтье в 1834 году. Оно обратное явлению Зеебека: при прохождении тока в цепи из различных проводников в местах контактов в дополнение к теплу Джоуля выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепла, пропорциональное протекающему через контакт электрическому заряду, т.е. произведению силы тока  $I$  на время его протекания. Таким образом, за единицу времени выделяется (или поглотится) тепло

$$Q_P = \Pi I. \quad (2)$$

Коэффициент  $\Pi$  зависит от рода соприкасающихся проводников и от их температуры. Он называется **коэффициентом Пельтье**. Измеряется в вольтах.

**Явление Томсона** заключается в следующем: если вдоль проводника, по которому протекает ток, существует перепад температур  $T_2 - T_1$ , то в дополнение к теплу Джоуля в объеме проводника в единицу времени выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепла

$$Q_T = \tau(T_2 - T_1)I.$$

Коэффициент  $\tau$  зависит от природы проводника и от температуры. Он называется **коэффициентом Томсона**.

Количественная теория термоэлектрических явлений может быть построена только на основе квантовой механики; в рамках классической физики можно лишь наметить грубо качественную картину, позволяющую наглядно представить причины возникновения этих эффектов, но не дающую согласия с опытом часто даже по порядку величины. Согласно классической электронной теории металл состоит из кристаллической решетки, заряженной положительно, и электронов, которые

Методические указания  
к лабораторным работам по физике

Составители  
Р.П.Колалис  
И.Р.Крылов  
В.Е.Яхонтова

свободно движутся внутри этой кристаллической решетки подобно молекулам идеального газа. На границе двух проводников А и В вследствие теплового движения возникают встречные потоки электронов. Если число электронов в единице объема каждого проводника неодинаково, скажем,  $n_A > n_B$ , то поток из А в В будет более интенсивным, чем из В в А, и число электронов в В начнет возрастать. Это приведет к понижению потенциала проводника В и возрастанию потенциала А. Процесс прекратится, когда возникшая разность потенциалов выровняет электронные потоки. Таким образом, на границе двух проводников возникнет разность потенциалов. Однако, если температуры всех контактов одинаковы, эта контактная разность потенциалов не ведет к возникновению тока. Действительно, скачки потенциала в контактах будут одинаковыми по величине, и противоположными по направлению и скомпенсируют друг друга. Но если контакты находятся при разной температуре, скачки потенциалов будут неодинаковы, и это приведет к появлению в цепи эдс – это и есть термоэдс.

Если через цепь, составленную из разных металлов, пропускать электрический ток, то в одном контакте электронам приходится преодолевать контактную разность потенциалов, энергия электронов при этом уменьшается, в другом контакте, наоборот, энергия электронов при прохождении контакта увеличивается. Сталкиваясь с кристаллической решеткой, электроны передают ей избыток (или недостаток) энергии и, таким образом, один контакт охлаждается, другой – нагревается. Это – явление Пельтье.

Если однородный проводник находится в условиях, когда в нем имеется градиент температуры, и мы пропустим через такой проводник ток, то, если направление тока соответствует движению электронов от более горячего конца к холодному, такие электроны будут отдавать излишнюю тепловую энергию и проводник будет нагреваться, при противоположном направлении тока – охлаждаться – наблюдается эффект Томсона.

Из приведенных объяснений видно, что все три процесса имеют общее происхождение. Значит, три характеризующие эти процессы коэффициента должны быть связаны между собой. Так и есть на самом деле, и эту связь можно получить из самых общих, термодинамических, соображений. Исходя из законов термодинамики можно получить:

$$\Pi = \alpha T, \quad (3)$$

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{T} (\tau_1 - \tau_2). \quad (4)$$

Здесь  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – коэффициенты Томсона для двух проводников, составляющих цепь с электродвижущей силой  $\alpha$ . Вывод формул (3) и (4) приведен в Приложении 1.

Соотношения (3) и (4) не зависят от механизма возникновения термоэффектов (при выводе формул предполагалось лишь, что все три процесса – обратимые). Поэтому они справедливы не только для металлов, но и для полупроводников. Но если для металлов термоэдс весьма мала (несколько микровольт на градус Цельсия), то для полупроводников она может быть значительно (на несколько порядков) больше. Термоэлектрические явления широко используются в науке и технике. Система из двух разнородных проводников, спаянных концами и дающих заметную термоэдс называется **термопарой** и применяется для измерения температуры. А эффект Пельтье чаще всего используют для создания маломощных охлаждающих систем. Полупроводники различной природы спаивают таким образом, чтобы

суммарный эффект увеличивался. Как это сделать видно из рис.1. Здесь столбики *n* и *p* – это полупроводники разного рода, подобранные так, чтобы устройство было максимально эффективным. В верхней части ток идет от *n* к *p* и все спай охлаждается, в нижней части всё наоборот. Объединение большого

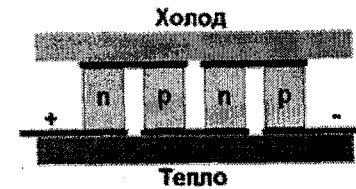


Рис.1

количества пар полупроводников *p*- и *n*-типа позволяет создавать охлаждающие элементы – модули Пельтье – сравнительно большой мощности. Структура полупроводникового термоэлектрического модуля Пельтье представлена на рис. 2, а на рис.3. показан внешний вид типичного модуля.

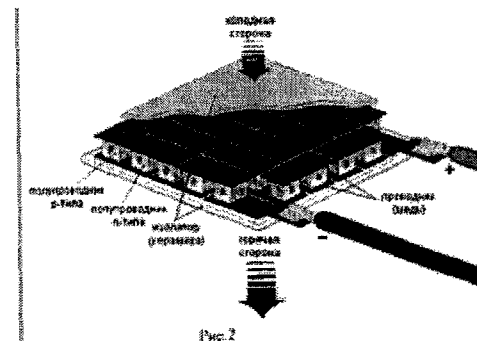


Рис.2

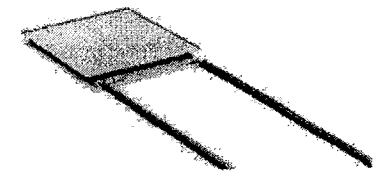


Рис.3

### Холодильник Пельтье.

Цель нашей работы – исследование холодильника Пельтье. Объектом исследования является холодильник промышленного производства, применяющийся для охлаждения процессоров персональных компьютеров. На рис. 4 представлен внешний вид этого устройства. Одна из сторон модуля Пельтье прижата к радиатору, обдувается вентилятором и таким образом поддерживается при постоянной температуре, а вторая при пропускании тока через модуль охлаждается и принимает на себя тепло от окружающей среды.

Если пропускать ток в обратном направлении, то это же устройство будет работать как нагреватель.

В нашей установке вторая, не обдуваемая вентилятором, поверхность модуля закрыта крепежной пластинкой, плохо проводящей тепло,

так что теплообмен этой поверхности с внешней средой мал и модуль работает «сам на себя», охлаждая (или нагревая) только свою поверхность.

#### Расчет разности температур.

Рассмотрим подробнее работу прибора. Пропустим через модуль постоянный ток. На поверхностях модуля будет выделяться тепло Пельтье (на одной поверхности – положительное, на другой – отрицательное, т.е. поглощение). Внутри модуля будет выделяться тепло Джоуля и тепло Томсона.

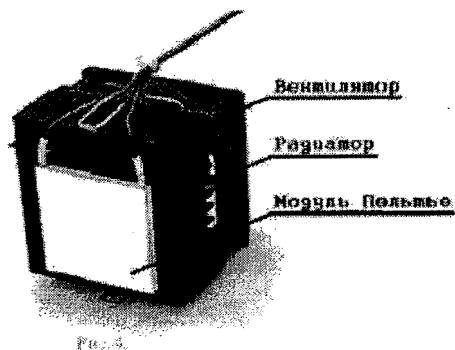


Рис.4

Рассчитаем разность температур, которая возникнет между поверхностями.

В модуле Пельтье много столбиков *n-p* полупроводников и они тесно примыкают друг к другу (см. рис. 2 и 3), поэтому в расчете мы можем не учитывать эту структуру, и рассматривать модуль как однородную пластинку.

Будем характеризовать модуль Пельтье следующими параметрами:

- $R$  омическое сопротивление модуля. Оно равно сумме сопротивлений всех столбиков полупроводников, составляющих модуль.
- $\alpha$  коэффициент термоэдс суммарный по всем спаям.
- $K$  теплопроводность пластинки – поток тепловой энергии между поверхностями пластинки при разности температур, равной единице.
- $P_1$  коэффициент Пельтье суммарный по всем спаям, примыкающим к одной стороне пластинки, и определенный при комнатной температуре  $T_1$ . Этот параметр не является независимым, он связан с коэффициентом термоэдс уравнением (3), так что  $P_1 = \alpha T_1$ .

Параметры  $\alpha$ ,  $P$  и  $K$  – существенно положительные величины.

При расчете сделаем следующие допущения

- Одна поверхность пластинки находится при постоянной комнатной температуре  $T_1$  – считаем, что вентилятор хорошо исполняет свою функцию.
- Ток будем поддерживать не очень большим, чтобы перепад температур был невелик. Характеристики пластинки – ее теплопроводность  $K$ , омическое сопротивление  $R$  и коэффициент термоэдс  $\alpha$  в этом небольшом интервале температур будем считать постоянными величинами.

– Так как термоэдс  $\alpha$  в нашем приближении постоянна, то, согласно уравнению (4), тепло Томсона отсутствует. Поэтому мы его учитывать не будем.

– За положительное направление тока,  $I > 0$ , примем такое направление, когда прибор работает в своем нормальном режиме, как холодильник, то есть свободная (не обдуваемая вентилятором) поверхность охлаждается.

Выведем уравнение теплового баланса. Если поверхность пластинки, прижатая к вентилятору, поддерживается при постоянной температуре  $T_1$ , то температура второй поверхности,  $T_2$ , зависит от силы тока. Эта поверхность будет охлаждаться до тех пор, пока сумма тепла, поступающего из окружающей среды,  $Q_2$ , и тепла, поступающего от пластинки, не станет равной поглощаемойся теплоте Пельтье. Поток тепла, приходящий от пластинки, состоит из двух частей: потока теплопроводности  $K(T_1 - T_2)$  и тепла Джоуля  $RI^2$ . Можно показать (см. Приложение 2), что тепло Джоуля при любых перепадах температур распределяется между двумя поверхностями поровну, поэтому на рассматриваемую поверхность приходится  $\frac{RI^2}{2}$ . Условие стационарности будет иметь вид

$$P_2 I = K(T_1 - T_2) + \frac{RI^2}{2} + Q_2 \quad (5)$$

Всё это наглядно изображено на рис. 5, а более строгий расчет дан в

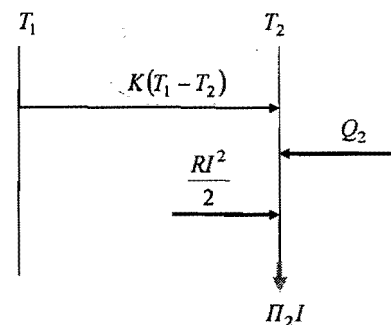


Рис.5

Приложении 2. Коэффициент  $P_2$  – это коэффициент Пельтье при температуре  $T_2$ . Этот коэффициент зависит от температуры. Из условия (3) следует  $P_2 = \alpha T_2$  и  $P_1 = \alpha T_1$ , где  $\alpha$  – термоэдс модуля, а  $P_1$  – коэффициент Пельтье при температуре  $T_1$ , которая в наших условиях – постоянная величина, поэтому и  $P_1$  – постоянно. Можем записать

$$\Pi_2 = \alpha T_2 = \alpha T_2 - \alpha T_1 + \alpha T_1 = \Pi_1 - \alpha(T_1 - T_2).$$

Подставим полученное значение  $\Pi_2$  в уравнение (5):

$$\Pi_1 I - \alpha(T_1 - T_2)I = K(T_1 - T_2) + \frac{RI^2}{2} + Q_2$$

и решим относительно разности температур. Получим

$$(T_1 - T_2) = \frac{\Pi_1 I - \frac{RI^2}{2} - Q_2}{K + \alpha I} \quad (6)$$

Рассмотрим внимательно формулу (6). Разность температур зависит как от параметров самого модуля ( $\Pi_1, \alpha, R, K$ ), так и от условий его эксплуатации – тока  $I$ , интенсивности обмена теплом с внешней средой  $Q_2$ . При прочих равных условиях разность температур на элементе Пельтье будет максимальной, если охлаждаемая поверхность находится в условиях идеальной термоизоляции,  $Q_2 = 0$ . Если же эта поверхность находится в тепловом контакте с каким-либо объектом, подлежащем охлаждению, (например, с электронной схемой, которую нужно охлаждать), то разность температур будет меньше.

Максимальная разность температур, которую можно получить с помощью холодильника Пельтье, получится, если в формуле (6) положить  $Q_2 = 0$  и найти максимальное значение разности  $T_1 - T_2$  как функции тока. При  $Q_2 = 0$  формула (6) принимает вид

$$(T_1 - T_2) = \frac{\Pi_1 I - \frac{RI^2}{2}}{K + \alpha I} \quad (7)$$

Чтобы разность температур оставалась положительной, т.е. прибор работал как холодильник, необходимо, чтобы ток был не слишком большим, иначе эффект Пельтье (пропорциональный току) не сможет преодолеть нагревание теплом Джоуля (пропорциональное квадрату тока). При токе  $I=0$  и  $I = \frac{2\Pi_1}{R}$  разность температур становится равной нулю, а максимум этой разности получится примерно посредине между этими значениями, при

$$I_{\max} \cong \frac{\Pi_1}{R} \quad (8)$$

(в действительности немного меньше из-за члена  $\alpha I$  в знаменателе). Повышать ток больше этого значения бесполезно – все равно больше холода не получишь. Подставив выражение (8) в формулу (7) и пренебрегая членом  $\alpha I$  в знаменателе получим значение максимальной достижимой разности температур при охлаждении:

$$(T_1 - T_2)_{\max} \cong \frac{\Pi_1^2}{2KR} = \frac{\alpha^2}{2KR} T_1^2 \quad (9)$$

Таким образом: работа холодильника зависит от величины  $z = \frac{\alpha^2}{KR}$ ; чем больше  $z$ , тем лучше. При конструировании холодильников учитывают именно это условие.

Через модуль можно пропускать ток и в обратном направлении. В таком случае прибор будет работать как нагреватель. Все выведенные соотношения остаются в силе, нужно только положить в них  $K < 0$ . Здесь тоже есть свои особенности: и тепло Пельтье и тепло Джоуля действуют в одном направлении, нагревая поверхность модуля, причем чем выше температура  $T_2$ , тем тепло Пельтье больше (вспомним формулу (3)), а отводится оно только в силу теплопроводности. В итоге разность температур будет быстро увеличиваться и обратится в бесконечность при конечном значении тока. Математически это означает, что при «токе разрушения»

$$I_{\text{разр}} = -\frac{K}{\alpha} \quad (10)$$

знаменатель выражения (7) обратится в ноль, а физически – температура  $T_2$  станет настолько большой, что прибор просто разрушится. Доводить ток до такой величины нельзя, это губительно для прибора!

#### Задача работы.

В работе нужно  
– Экспериментально определить параметры холодильника Пельтье  $\alpha, R, K$  и  $\Pi_1$ ; – Вычислить значение тока  $I_{\max}$ , соответствующего максимальной разности температур при работе прибора в качестве холодильника и максимальную разность температур  $(T_1 - T_2)_{\max}$ , которую можно при этом получить.

– Оценить «ток разрушения»  $I_{\text{разр}}$  при работе прибора в качестве нагревателя;

#### Экспериментальное определение параметров холодильника Пельтье.

Будем пропускать постоянный ток  $I$  через модуль Пельтье в пределах от  $I = 1\text{А}$  до  $I = -1\text{А}$  и измерять разность потенциалов на контактах модуля, ток через него и разность температур, установившуюся между поверхностями модуля Пельтье. Для измерения разности температур в нашей установке используется термopара, электрически не связанная с модулем. Спаи термopары прижаты к поверхностям модуля, так что температуры спаев равны  $T_1$  и  $T_2$ . Коэффициент термоэдс  $\alpha'$  для этой термopары нам неизвестен, но мы предполагаем, что он не зависит от температуры, так что термоэдс  $\epsilon$  пропорциональна разности температур поверхностей  $\epsilon = \alpha'(T_1 - T_2)$ .

Как уже говорилось, одна из поверхностей модуля прижата к радиатору, обдуваемому вентилятором, поэтому можно считать, что теплообмен с внешней средой настолько велик, что эта поверхность всегда находится при постоянной температуре  $T_1$ . Вторая поверхность в нашей установке закрыта крепежной

пластинкой, плохо проводящей тепло. Теплообмен этой поверхности с внешней средой (поток  $Q_2$ ) мы не можем ни изменить по своему желанию, ни определить. Однако он невелик по сравнению с потоком теплопроводности через модуль. В расчетах будем полагать  $Q_2=0$  и пользоваться формулой (7), а наличие теплообмена  $Q_2$  выразится в том, что определенное нами значение коэффициента теплопроводности  $K$  в формуле (7) получится несколько завышенным.

В результате измерений мы будем иметь две кривые, выражающие зависимость разности температур и падения напряжения на контактах модуля Пельтье силы тока через модуль. Эти кривые нужно сравнить с расчетными кривыми, которые мы сейчас получим.

Для определения параметров холодильника Пельтье удобно представить разность температур (7) в виде разложения в ряд по степеням  $I$ . У нас выполняется условие  $\left|\frac{\alpha}{K}I\right| < 1$  (иначе ток достигнет значения «тока

разрушения», см. формулу (10)). Тогда дробь  $\frac{1}{1 + \frac{\alpha}{K}I}$  можно представить в виде

бесконечного ряда

$$\frac{1}{1 + \frac{\alpha}{K}I} = 1 - \frac{\alpha}{K}I + \left(\frac{\alpha}{K}I\right)^2 - \left(\frac{\alpha}{K}I\right)^3 + \dots \quad (11)$$

Подставим разложение (11) в уравнение (7). Получим

$$\begin{aligned} T_1 - T_2 &= \frac{1}{K} \left[ \left( \Pi_1 I - \frac{RI^2}{2} \right) \left( 1 - \frac{\alpha}{K}I + \left(\frac{\alpha}{K}I\right)^2 - \left(\frac{\alpha}{K}I\right)^3 + \dots \right) \right] = \\ &= \frac{1}{K} \left[ \Pi_1 I - \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) I^2 + \left( \frac{\alpha}{K} \right) \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) I^3 - \left( \frac{\alpha}{K} \right)^2 \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) I^4 + \dots \right] \end{aligned}$$

или

$$(T_2 - T_1) = \frac{1}{K} \left[ \Pi_1 I - \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) I^2 + S \right] \quad (12)$$

Здесь  $S$  – члены ряда порядка  $I^3$  и выше:

$$S = \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) \left( \left( \frac{\alpha}{K} \right) I^3 - \left( \frac{\alpha}{K} \right)^2 I^4 + \dots \right)$$

Термоэдс равна

$$\varepsilon = \alpha'(T_2 - T_1) = \frac{\alpha'}{K} \left[ \Pi_1 I - \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) I^2 + S \right]$$

Запишем полученную зависимость в виде

$$\varepsilon = AI - BI^2 + \frac{\alpha'}{K} S \quad (13)$$

$$A = \frac{\alpha'}{K} \Pi_1 \quad (14)$$

$$B = \frac{\alpha'}{K} \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) \quad (15)$$

Кроме разности температур мы измеряем также падение напряжения на контактах модуля Пельтье  $U$ . Оно складывается из падения напряжения на омическом сопротивлении  $IR$  и действующей в цепи термоэдс,

$$U = IR + \alpha(T_1 - T_2) \quad (16)$$

Подставим в выражение (16) значение разности температур по (12), получим

$$U = IR + \frac{\alpha}{K} \left[ \Pi_1 I - \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) I^2 + S \right]$$

или

$$U = \left( R + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) I - \frac{\alpha}{K} \left[ \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) I^2 \right] + \frac{\alpha}{K} S$$

Выражение для  $U$  можно записать в виде

$$U = CI - DI^2 + \frac{\alpha}{K} S \quad (17)$$

$$C = R + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \quad (18)$$

$$D = \frac{\alpha}{K} \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) \quad (19)$$

Зная коэффициенты  $A, B, C$  и  $D$  можем вычислить и параметры, характеризующие исследуемый прибор. Итак, имеем систему уравнений

$$A = \frac{\alpha'}{K} \Pi_1 \quad (14)$$

$$B = \frac{\alpha'}{K} \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) \quad (15)$$

$$C = R + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \quad (18)$$

$$D = \frac{\alpha}{K} \left( \frac{R}{2} + \frac{\alpha}{K} \Pi_1 \right) \quad (19)$$

Решение можно легко получить исключая из системы последовательно неизвестные величины. Так, из уравнения (14) получим  $\frac{\alpha'}{K} = \frac{A}{\Pi_1}$ . Подставляя это значение в (15), получим  $\frac{\alpha}{K} = \frac{B}{A} - \frac{R}{2\Pi_1}$ . Продолжая аналогичные действия, получим решения уравнений в виде

$$R = C - \frac{A}{B} D \quad (20)$$

$$P_1 = \frac{A}{2B} \left( C + \frac{A}{B} D \right) \quad (21)$$

$$\frac{\alpha}{K} = \frac{2D}{C + \frac{A}{B} D}$$

$$\frac{\alpha'}{K} = \frac{2B}{C + \frac{A}{B} D}$$

Таким образом постоянные  $R$  и  $P_1$  мы определили. Далее используем соотношение  $P_1 = \alpha T_1$ . Оно позволит нам определить коэффициент термоэдс модуля  $\alpha$ , коэффициент теплопроводности  $K$  и даже коэффициент термоэдс термопары  $\alpha'$ . Получим

$$\alpha = -\frac{1}{T_1} \frac{A}{2B} \left( C + \frac{A}{B} D \right), \quad (22)$$

$$K = \frac{1}{T_1} \frac{A}{4BD} \left( C + \frac{A}{B} D \right)^2 \quad (23)$$

$$\alpha' = -\frac{1}{T_1} \frac{A}{2D} \left( C + \frac{A}{B} D \right) \quad (24)$$

Здесь  $T_1$  – комнатная температура.

#### Порядок выполнения работы.

В работе нужно собрать электрическую схему, изображенную на рис.6. Включите шнур питания цифрового вольтметра В7-65 в сеть 220 Вольт и кнопку "включения питания" на задней стенке вольтметра для моделей В7-65 и В7-65/2 или вытяните на себя кнопку питания на передней панели для модели вольтметра В7-65/3. Включить питание вольтметра нужно пораньше, до сборки остальной электрической схемы, так как вольтметр после включения некоторое время проходит автотест.

Обсудим подробнее работу с вольтметром В7-65. В два гнезда «U,R,F» и «0», расположенных одно под другим в правом верхнем углу передней панели цифрового вольтметра, должны быть включены два провода со штекерами на концах, чтобы удаленные от вольтметра концы проводов можно было втыкать в клеммы, а не привинчивать под клеммы. В процессе работы эти штекеры вольтметра втыкают то в клеммы 1 и 2 (рис.6), то в клеммы 3 и 4, то в клеммы 5 и 6. Напряжение между клеммами 1 и 2, как и между клеммами 3 и 4 составляет несколько вольт. Напряжение термопары между клеммами 5 и 6 на три порядка меньше. Чтобы постоянно не переключать чувствительность вольтметра, нужно перевести его в режим автоматического выбора диапазона измерений. Для перевода в этот режим

служит средняя кнопка (со стрелкой "вверх") из трех кнопок верхнего ряда передней панели вольтметра. Нажатие этой кнопки включает и выключает режим автоматического выбора диапазона. Когда установлен автоматический режим, в левом верхнем углу над цифрами напряжения светится надпись "ABIP".

Схема, изображенная на рис.6, содержит два одинаковых источника питания DC POWER SUPPLY HY3003. Источник питания включается и выключается нажатием кнопки «Power». Выход источника питания оформлен в виде трех клемм. Средняя клемма в работе не используется. Две крайних клеммы источника обозначены знаками "-" (левая клемма) и "+" (правая клемма). В источнике питания можно одновременно задать значения стабилизации напряжения и тока. Ручками под надписью «Current» (сила тока), «Fine» (тонкая регулировка) и «Coarse» (грубая регулировка), можно задать стабилизируемое значение силы тока источника. Ручками под надписью «Voltage» (напряжение), «Fine» (тонкая регулировка) и «Coarse» (грубая регулировка), можно задать стабилизируемое напряжение источника. Силу тока и напряжение источник стабилизирует не одновременно, а или – или. Если нагрузка, подсоединенная к источнику, потребляет мало тока (меньше, чем заданное ручками стабилизируемое значение), то источник стабилизирует выходное напряжение между клеммами «-» и «+» при этом светится индикаторный светодиод под надписью «Voltage» (напряжение). Если уменьшать сопротивление нагрузки, то ток источника возрастает. Когда ток

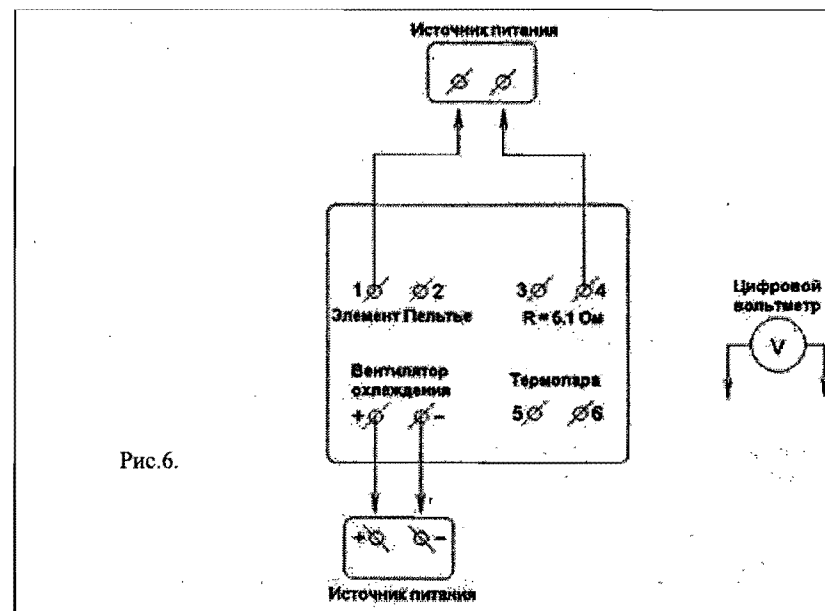


Рис.6.

источника достигает заданного ручками значения тока стабилизации, источник переключается из режима стабилизации напряжения в режим стабилизации силы тока. При этом загорается индикаторный светодиод под надписью «Current» (сила тока). В результате напряжение источника, и сила тока ограничены заданными значениями.

Один из двух источников используется для питания вентилятора охлаждения элемента Пельтье. **При подключении питания к вентилятору не перепутайте полярность питания!** Вентилятором управляет встроенная транзисторная схема. Неверная полярность питания вентилятора может вывести транзисторную схему из строя. «Плюс» питания соединяется с «плюс» клеммой вентилятора. При работе вентилятора рука, поднесенная к вентилятору, должна чувствовать поток воздуха.

Последовательно соединенные "Элемент Пельтье" и резистор " $R = 5.1 \text{ Ом}$ " нужно подключить ко второму источнику питания. Между клеммой 2 элемента Пельтье и клеммой 3 резистора внутри коробки установлена перемычка, поэтому к источнику питания достаточно подключить клеммы 1 и 4, как показано на рис.6. Контакты 5 и 6 термопары вообще не нужно соединять гальванически с остальной схемой.

В процессе работы меняют величину напряжения источника питания. Нужно измерить две зависимости. Первая — зависимость напряжения на элементе Пельтье от силы тока через элемент, вторая — зависимость эдс термопары от силы тока через элемент. Измерения тока через элемент Пельтье нужно произвести в обеих полярностях в диапазоне от -1 Ампера до +1 Ампера. Ток по модулю не должен превышать одного Ампера, чтобы избежать теплового разрушения элемента Пельтье. Для изменения полярности напряжения поменяйте места провода, идущие к клеммам 1 и 4 от источника питания. При изменении полярности тока изменяется полярность напряжения на элементе Пельтье и полярность напряжения термо ЭДС. Измеряемые зависимости не имеют симметрии относительно начала координат, поэтому строго следите и записывайте знак силы тока, чтобы не перепутать, какие точки графиков относятся к положительным и какие к отрицательным токам.

По результатам измерений нужно составить таблицу из трех столбцов: напряжение на элементе Пельтье (между клеммами 1 и 2), напряжение между клеммами 3 и 4 (для определения силы тока через элемент Пельтье путем деления напряжения на сопротивление  $5.1 \text{ Ом}$ ), напряжение термоэдс (между клеммами 5 и 6). Рекомендуется провести измерения именно таким образом, хотя возможны и другие варианты, так как лабораторная установка содержит избыточное количество измерительных приборов.

Другая возможность получить нужные величины состоит в том, чтобы измерить суммарное напряжение на элементе Пельтье и резисторе  $5.1 \text{ Ом}$  по показаниям встроенного цифрового вольтметра источника питания, который содержит цифровые индикаторы тока и напряжения источника. Это позволяет измерять одно из двух слагаемых напряжений вольтметром В7-65, а второе напряжение определять как разность показаний двух приборов. Третья возможность состоит в непосредственном измерении силы тока через элемент Пельтье по показаниям цифрового амперметра

источника питания, а не путем измерения напряжения на резисторе  $5.1 \text{ Ом}$  и пересчете напряжения в силу тока.

Но все эти варианты менее точные. Напряжение термоэдс нужно в любом случае измерять цифровым вольтметром В7-65

При изменении напряжения источника питания изменятся сила тока в цепи элемента Пельтье. При этом изменяется мощность, выделяющаяся или поглощающаяся на каждой из двух поверхностей модуля Пельтье, изменяется температура поверхностей и изменяется величина термоэдс.

Температуры контактов элемента Пельтье устанавливаются крайне медленно. Опыт показывает, что напряжение на элементе Пельтье устанавливается с точностью до десятой доли процента не быстрее, чем за три — пять минут. Установив какое-либо значение тока следите за изменением эдс термопары и записывайте показания только тогда, когда эдс установится. Но и в этом случае Вы не застрахованы от того что инерция установки не внесет систематическую погрешность в Ваши измерения. Для того, чтобы уменьшить эту погрешность, проводите измерения сначала в одном, затем в обратном направлении. Например, сначала изменяйте ток от +1 Ампера до -1 Ампера, а затем — от -1 Ампера до +1 Ампера. В идеале первая и последняя точки должны совпасть. Другим контролем являются значения при токе, равном нулю — очевидно, в этом случае эдс термопары тоже должна равняться нулю.

В каждой полярности напряжения источника снимите 5 — 10 точек обоих графиков, по возможности равномерно расположенные по силе тока, и столько же точек при обратном ходе. Силу тока удобно контролировать (но не измерять) по показаниям цифрового индикатора источника питания. Следите за полярностью силы тока и записывайте ее.

Начните измерения с самой холодной площадки над элементом Пельтье, затем пошагово понижайте напряжение источника питания до нуля, поменяйте полярность напряжения и повышайте напряжение в новой полярности. Затем сделайте такие же измерения в обратном порядке. Не старайтесь каждый раз устанавливать одни и те же значения тока: это довольно затруднительно и приведет к большим потерям времени. После каждого изменения напряжения источника, выждав необходимое время снимите подряд и запишите в одну строку таблицы три напряжения: на элементе Пельтье, на известном сопротивлении и на клеммах термопары. Учтите, что прикосновение пальцем к площадке над элементом Пельтье или дуновение ветра над площадкой нарушают тепловое равновесие. В таком случае перед измерением 3-х напряжений в очередной точке нужно снова ждать установления термического равновесия.

### Обработка измерений.

Обработка измерений проводится в дисплейном классе. При обработке используется программа ORIGIN специально предназначенная для обработки экспериментальных данных..

У Вас имеется экспериментально полученная зависимость эдс термопары от тока через модуль пельтье  $I$  и зависимость напряжения на модуле от тока.



Вам нужно аппроксимировать эти зависимости полиномами по степеням  $I$  и определить коэффициенты при  $I$  и  $I^2$  в этих полиномах.

Для каждой из двух зависимостей сделайте следующее. Нанесите на график полученные Вами экспериментальные точки. Аппроксимируйте полученный график полиномом степени  $n$

$$F(X) = B_0 + B_1 X + B_2 X^2 + \dots + B_n X^n$$

Степень полинома  $n$  вы задаете сами. Вам нужно выбрать такое  $n$ , чтобы полином как можно лучше описал расчетную кривую, представленную формулами (13) или (17). Для определения параметров холодильника Пельтье Вам понадобятся только члены, содержащие  $X$  и  $X^2$ , но если Вы ограничитесь полиномом 2 степени, эти коэффициенты получатся с большой ошибкой, так как кривая не является параболой. Повышать степень полинома выше, чем  $X^4$  тоже не стоит – полином будет отражать ошибки ваших измерений и неточности принятой при расчете модели (в частности, систематические ошибки, которые мы делаем, не учитывая зависимость сопротивления  $R$  от температуры, принимая температуру  $T_1$  постоянной и т.п.). Чтобы выбрать оптимальную степень полинома аппроксимируйте ваши экспериментальные данные последовательно полиномами степени  $n=2,3,4$ ... Рассмотрите эти аппроксимации.

– убедитесь, что член  $B_0$  мал; если это не так, значит Ваши экспериментальные данные плохие;

– убедитесь, что коэффициенты  $B_0, B_1, B_2, \dots$  составляют знакопеременный ряд; начиная с некоторого  $n$  это условие может перестать выполняться. Такие полиномы рассматривать не стоит

– значения коэффициентов  $B_1$  и  $B_2$  немного меняются при изменении степени полинома; погрешности определения этих коэффициентов с возрастанием  $n$  сначала уменьшаются, достигают минимального значения, дальше начинают увеличиваться. Полином, который отвечает наименьшим значениям погрешностей, и будет оптимальным. Остановитесь на этом полиноме.

Определите коэффициенты  $A, B$  разложения (13) и  $C, D$  разложения (17). Вычислите значения величин  $R, P, K, \alpha$  и  $\alpha'$  по формулам (20) – (24). Вычислите значение тока, соответствующего максимальной разности температур при охлаждении по формуле (8) и максимально возможную разность температур по формуле (9). Определите «ток разрушения» по формуле (10).

Естественно, все величины определяются с их погрешностями. При вычислении погрешностей обратите внимание на то, что в большинство расчетных формул входит выражение  $(C + A \frac{D}{B})$ . Разумно будет рассчитать это выражение и его погрешность отдельно, а затем использовать его как независимую величину. При этом мы несколько изменяем рассчитанную погрешность для величин  $P, K$  и др, так как в них, помимо выражения

$(C + A \frac{D}{B})$  входят коэффициенты  $A, B, C$  или  $D$ , но этим можно пренебречь.

В Приложении 3 вы найдете характеристики некоторых выпускаемых промышленностью модулей Пельтье и значения термоэдс некоторых наиболее употребительных термопар. Поинтересуйтесь, соответствуют ли полученные вами величины каким-либо из этих характеристик.

### Содержание отчета.

Кроме стандартных составляющих отчета (схема установки, расчетные формулы, формулы погрешностей и т.п.) отчет должен содержать все экспериментальные данные, результаты обработки каждой из двух кривых – коэффициенты  $B_0, B_1, B_2, \dots$  для полиномов степени  $n=2,3,4$  (при необходимости и выше), обоснование выбора оптимальной степени полинома, коэффициенты  $A, B, C, D$ , которые вы используете в дальнейшей обработке.

### Приложение 1

#### Соотношение между термоэлектрическими коэффициентами.

Рассмотрим замкнутую цепь из двух разнородных проводников, спаянных концами. Пусть один спай поддерживается при температуре  $T_1$ , а второй – при температуре  $T_2$ . Рассмотрим количество энергии, которое выделяется и поглощается в единицу времени. В цепи возникает термоэдс  $\epsilon = \alpha(T_2 - T_1)$ , течет ток  $I$  и выделяется мощность  $\epsilon I = \alpha(T_2 - T_1)I$ . При

прохождении тока в одном контакте выделяется тепло Пельтье  $\Pi_1 I$ , в другом контакте – тепло Пельтье  $\Pi_2 I$  поглощается. Кроме того, в одном проводнике выделяется тепло Томсона  $\tau_1(T_2 - T_1)I$ , а во втором – поглощается тепло  $\tau_2(T_2 - T_1)I$ . Происходит также выделение тепла Джоуля и имеет место теплопроводность. Однако теплом Джоуля можно пренебречь если разность температур  $T_2 - T_1$  взять бесконечно малой. Действительно, тепло Пельтье пропорционально первой степени силы тока, тогда как тепло Джоуля – второй. При стремлении разности температур к нулю ток также стремится к нулю, и тепло Джоуля становится исчезающее малым по сравнению с теплом Пельтье. Теплопроводность же не связана с выделением и поглощением тепла, а только переносит тепло из одной точки в другую и никак не влияет на общий энергетический баланс. Поэтому мы можем рассматривать только термоэлектрические явления.

Закон сохранения энергии запишется в виде

$$\Pi_1 I + \tau_1(T_2 - T_1)I + \alpha(T_2 - T_1)I - \Pi_2 I - \tau_2(T_2 - T_1)I = 0$$

Сокращая на  $I$  и учитывая, что  $T_2 = T_1 + dT$  и  $\Pi_2 = \Pi_1 + \frac{d\Pi}{dT} dT$  получим первое соотношение между термоэлектрическими коэффициентами в виде

$$\frac{d\Pi}{dT} + (\tau_2 - \tau_1) = \alpha \quad (1)$$

Второе соотношение для термоэлектрических коэффициентов может быть получено на основе уравнения второго начала термодинамики, применимого, однако, только к обратимым процессам. Все три явления следует

считать обратимыми: они меняют знак как с изменением знака разности температур  $dT$ , так и с изменением направления тока  $dI$ . Однако в термоэлектрической цепи неизбежно возникают и необратимые процессы – теплопроводность и выделение тепла Джоуля. Томсон предположил, что термоэлектрические явления не связаны органически с процессами теплопроводности и с выделением тепла Джоуля. Теплопроводность проводника и его удельное сопротивление не определяют эффектов Зеебека, Пельтье и Томсона; можно рассмотреть эти три явления отдельно, считая теплопроводность и сопротивление как угодно малыми и пренебрегая необратимыми процессами как побочными, случайными.

Итак, будем рассматривать обратимые (термоэлектрические) процессы в отрыве от необратимых (теплопроводность, тепло Джоуля). Применим второе начало термодинамики к термоэлектрическим процессам при температурах горячего и холодного спаев  $T_1$  и  $T_2 = T_1 + dT_1$ . Горячий спай получает количество тепла  $\Pi_2 I$ , а холодный отдает  $\Pi_1 I$ , в то время как в каждом из проводников с разностью температур  $dT$  при температуре  $T$  выделяется теплота  $\tau I dT$ . Обратимость процессов приводит к условию, что общее изменение энтропии всех процессов равно нулю:

$$\frac{\Pi_2}{T_2} I - \frac{\Pi_1}{T_1} I + I \frac{\tau_2 - \tau_1}{T} dT = 0$$

Сократив на  $I$ , получим

$$\frac{\Pi_2}{T_2} - \frac{\Pi_1}{T_1} + \frac{\tau_2 - \tau_1}{T} dT = 0$$

Но разность  $\frac{\Pi_2}{T_2} - \frac{\Pi_1}{T_1}$  это есть приращение величины  $\frac{\Pi}{T}$  при изменении

температуры на  $dT$ , то есть можно написать

$$\frac{\Pi_2}{T_2} - \frac{\Pi_1}{T_1} = \frac{d}{dT} \left( \frac{\Pi}{T} \right) = \frac{1}{T^2} \left( T \frac{d\Pi}{dT} - \Pi \right) = \frac{\tau_1 - \tau_2}{T}$$

или

$$\frac{d\Pi}{dT} - \frac{\Pi}{T} = \tau_1 - \tau_2 \quad (2)$$

Подставляя сюда  $\tau_1 - \tau_2$  из (1), получим  $\alpha = \frac{\Pi}{T}$  или

$$\Pi = \alpha T \quad (3)$$

– соотношение, приведенное в основном тексте описания.

Дифференцируя (3) и заменяя числитель по уравнению (2) получим

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{T \frac{d\Pi}{dT} - \Pi}{T^2} = \frac{d\Pi}{dT} - \frac{\Pi}{T} = \frac{1}{T} (\tau_1 - \tau_2),$$

или

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{T} (\tau_1 - \tau_2). \quad (4)$$

Это совпадает с формулой (4) основного текста.

## Приложение 2

### Расчет разности температур поверхностей модуля Пельтье.

Модуль Пельтье, используемый в работе, можно представить как плоский однородный бесконечный слой, внутри которого выделяется тепло Джоуля, а на границах слоя – тепло Пельтье. С границ слоя идет отвод тепла во внешнюю среду. Скорость отвода тепла от границ слоя зависит от разности температур границы и окружающей среды (воздух комнаты), и от условий теплопередачи (в нашей установке одна из границ обдувается вентилятором, а вторая немного – крепежной пластинкой – теплоизолирована).

При таком приближении мы пренебрегаем структурой модуля, состоящего в действительности из некоторого количества столбиков из полупроводников, и пренебрегаем краевыми эффектами. Это можно сделать, т.к. элемент достаточно тонок и уход тепла с торцов мал по сравнению с уходом тепла через границы слоя. Кроме того, т.к. все столбики находятся почти в одинаковых условиях, то переход тепла внутри идет в основном перпендикулярно границам слоя, а параллельно границам – практически отсутствует.

Рассмотрим однородный бесконечный слой, расположенный между плоскостями  $x=0$  и  $x=l$ . Количество тепловой энергии, проходящей в единицу времени через единицу поверхности вещества слоя будет пропорционально градиенту температуры

$$j(x) = -\lambda \frac{dT(x)}{dx} \quad (1)$$

Здесь  $j(x)$  – это плотность потока тепловой энергии. Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  называется **коэффициентом внутренней теплопроводности вещества**. Знак «минус» в формуле означает, что тепло передается от точки с более высокой температурой к точке с более низкой. Так как рассматриваемый нами процесс стационарный, а слой однородный, то величины  $j$  и  $T$  зависят только от координаты  $x$ , а  $\lambda$  – постоянная величина (которую мы считаем не зависящей от температуры).

Если бы внутри слоя не было источников тепла, то плотность потока  $j$  в силу закона сохранения энергии должна была бы оставаться постоянной, не зависящей от координаты  $x$ . Если же как в нашем случае внутри слоя имеются источники тепла, то плотность потока  $j$  в толще пластинки изменяется, и изменение величины  $j$  на длине  $dx$  будет равняться количеству тепловой энергии, выделяющейся в объеме с площадью основания равной единице и длиной  $dx$ .

$$dj = q dx \quad (2)$$

Дифференцируя (1) и учитывая (2) получаем

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = -\frac{q}{\lambda} \quad (3)$$

Уравнение (3) называется **уравнением теплопроводности** (точнее – это вид уравнения для стационарного процесса в случае плоского однородного слоя вещества). Интегрируя обе части уравнения (3) получим решение уравнения. После первого интегрирования

$$\frac{dT}{dx} = C - \frac{q}{\lambda} x \quad (4)$$

и после второго

$$T(x) = T_1 + Cx - \frac{q}{2\lambda} x^2, \quad (5)$$

где  $C$  и  $T_1$  – постоянные интегрирования, которые следует найти из граничных условий. Положив в формуле (6)  $x=0$ , увидим, что  $T_1$  это температура границы слоя  $x=0$ . Приняв, что температура границы  $x=l$  равна  $T_2$  находим значение постоянной  $C$

$$C = \frac{T_2 - T_1}{l} + \frac{ql}{2\lambda}. \quad (6)$$

Подставив в формулу (1) выражение для  $\frac{dT}{dx}$  по (4), получим для плотности потока

$$j(x) = -\lambda \left( C - \frac{q}{\lambda} x \right). \quad (7)$$

Чтобы определить плотность потока тепловой энергии на границах (поверхностях пластинки)  $j(0)$  и  $j(l)$  подставим в формулу (7) значение постоянной  $C$  по (6) и положим сначала  $x=0$ , а затем  $x=l$ , получим

$$j(0) = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{l} - \frac{ql}{2} \quad (8)$$

$$j(l) = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{l} + \frac{ql}{2} \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) описывают потоки тепла внутри пластинки к её краям. Отсюда видно, что тепло Джоуля действительно, как мы и утверждали в основном тексте, перераспределяется поровну между поверхностями независимо от перепада температур.

Температуры  $T_1$  и  $T_2$  зависят не только от процессов, происходящих внутри слоя, но также и от того, что делается на его границах. На границе слоя должно выполняться условие стационарности – поток тепла, подходящий к границе слева плюс тепло Пельтье, выделяющееся на этой границе, равно теплу, отходящему от границы направо. Это даёт (см. рис.1):

$$p_1 + \pi_1 = j(0) \quad (10)$$

$$j(l) + \pi_2 = p_2$$

Здесь  $p_1$  – плотность потока тепла из внешней среды к границе  $x=0$ ,  $p_2$  – плотность потока тепла от границы  $x=l$  во внешнюю среду.

Рассмотрим поверхность  $x=l$ . Подставим в формулу (10) выражение для  $j(l)$  по формуле (9) получим

$$-\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{l} + \frac{ql}{2} + \pi_2 = p_2. \quad (11)$$

Это уравнение теплового баланса для поверхности  $x=l$ .

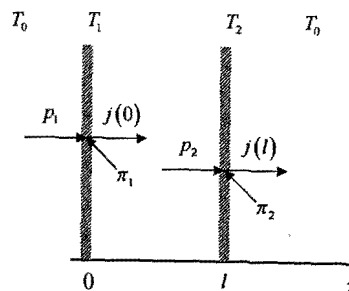


Рис.1.

Перейдем теперь от абстрактной задачи к нашему конкретному прибору. Пусть площадь поверхности модуля Пельтье равна  $S$ , а толщина модуля  $l$ . Пусть на каждой стороне модуля имеется  $N$  спаев  $n$ - и  $p$ -полупроводников (см. рис.1 основного текста) и сопротивление каждой пары (состоящей из полупроводников  $n$ - и  $p$ -типа) равно  $r$ . Через модуль Пельтье идет ток  $I$ . Количество тепла Джоуля, выделяющегося во всем модуле, равно  $qlS = NrI^2$ , откуда

$$ql = \frac{R}{S} I^2, \quad (12)$$

где  $R = Nr$  – омическое сопротивление всего модуля. Выберем положительное направление тока таким, чтобы поверхность «2» охлаждалась (это соответствует нормальной работе прибора в качестве охлаждающего устройства). Тогда

$$\pi_2 S = -P_2 I. \quad (13)$$

Здесь  $P_2$  – коэффициент Пельтье при температуре  $T_2$ , просуммированный по всем спаям поверхности «2», а знак «-» означает, что тепло не выделяется, а поглощается. Умножим все члены уравнения (11) на  $S$ , подставим в уравнение полученные выше выражения (12) для  $ql$  и (13) для  $\pi_2 S$ . Получим

$$-\lambda \frac{S}{l} (T_2 - T_1) + \frac{RI^2}{2} - P_2 I = p_2 S$$

Обозначим  $K = \lambda \frac{S}{l}$ ,  $Q_2 = -p_2 S$ . Величина  $K$  характеризует теплопроводность всей пластинки – это поток тепловой энергии через пластинку при разности

температур поверхностей в 1 градус, а величина  $Q_2$  это поток тепла к поверхности пластинки из окружающей среды. Учтем выведенное в основном тексте (на стр. 8) соотношение  $P_2 = P_1 - \alpha(T_1 - T_2)$  и решим уравнение относительно разности температур  $(T_1 - T_2)$ .

$$(T_1 - T_2) = \frac{P_1 I - \frac{RI^2}{2} - Q_2}{K + \alpha I} \quad (12)$$

Формула (12) совпадает с формулой (6) основного текста.

Предположим, что поток тепла, к поверхности в результате теплообмена с внешней средой, пропорционален разности температур этой поверхности и внешней среды. Это экспериментальный закон, полученный ещё Ньютоном. Он хорошо выполняется на практике при не очень большой разности температур. Будем считать также, что вентилятор в нашем приборе настолько хорошо выполняет свою функцию, что температура обдуваемой им поверхности равна температуре окружающего воздуха,  $T_1 = T_0$ . Тогда  $Q_2 = K_2(T_1 - T_2)$ . Коэффициент пропорциональности  $K_2$  это поток тепла от поверхности пластинки во внешнюю среду при разности температур в 1 градус. Подставив полученное выражение для  $Q_2$  в уравнение (12) и решив его относительно разности температур, получим

$$(T_1 - T_2) = \frac{P_1 I - \frac{RI^2}{2}}{K + K_2 + \alpha I}$$

Видно, что наличие теплообмена поверхности пластинки с внешней средой влияет так, что если им пренебрегать в расчете, коэффициент теплопроводности, который мы определяем в нашем эксперименте, является суммой величин  $K$  и  $K_2$ . Это мы и имели ввиду, утверждая в основном тексте (стр.10), что определенное нами значение коэффициента теплопроводности получится несколько завышенным.

В представленной ниже таблице приведен ряд выпускаемых модулей Пельтье.

#### Модули Пельтье фирмы Остерм

Номер	I <sub>max</sub> , А	U <sub>max</sub> , В	Q <sub>c max</sub> , Вт	dT <sub>max</sub> , К	LxWxH, Мм
«1-127-1/0,8	6,0	15,4	50,0	71	30x30x3,1
«1-241-1/0,8	6,0	29,2	95,0	71	40x40x3,1
«1-127-1/1,3	3,9	15,4	33,4	73	30x30x3,6
«1-241-1/1,3	3,9	29,2	63,4	73	40x40x3,6
«1-127-1/1,5	3,0	15,4	27,0	73	30x30x3,8
«1-241-1/1,5	3,0	29,2	51,2	73	40x40x3,8
«1-71-1,4/1,1	8,5	8,6	41,9	71	30x30x3,8
«1-127-1,4/1,1	8,5	15,4	75,0	71	40x40x3,8
«1-71-1,4/1,5	6,0	8,6	30,0	73	30x30x3,9
«1-127-1,4/1,5	6,0	15,4	53,0	73	40x40x3,9
«1-127-2/1,5	13,0	15,5	120	73	55x30x4,6

Термоз.д.с. ( мВ ) термопары хромель - конпель (ХК ) (холодные концы при 0°C).

T°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0.65	1.31	1.98	2.66	3.35	4.05	4.76	5.48	6.21

Термоз.д.с. (мВ) термопара хромель - алюмель (ХА) (холодные концы при 0°C).

T°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0		0.40	0.80	1.20	1.61	2.02	2.43	2.85	3.26	3.68