

## Изучение эффекта Пельтье

### Введение

Термоэлектрическими явлениями называют явления, связывающие тепловые и электрические эффекты. Если через контакт между двумя проводниками пропускать электрический ток, то на этом контакте в зависимости от направления тока будет выделяться или поглощаться тепло. Это явление называется эффектом Пельтье. Рассмотрим в общих чертах причины возникновения термоэлектрических явлений.

Квантовая механика утверждает, что ограниченная в пространстве система, такая как атом или кристалл, может иметь только дискретные состояния энергии. Кроме того, принцип Паули запрещает двум электронам находиться в одном состоянии. Всё вместе приводит к тому, что в атоме электроны занимают дискретные уровни, а в твердом теле – полосы возможных состояний. Самая высокая энергия, которую имеют электроны в твердом теле, называется энергией Ферми. И в атоме, и в твердом теле электроны связаны, то есть их энергия меньше, чем энергия свободного электрона. Для отрыва электрона от твердого тела необходимо совершить работу, называемую работой выхода. Она равна энергии Ферми со знаком минус. Каждое вещество характеризуется своей работой выхода. В металлах (и, с оговорками, в полупроводниках) самые энергичные электроны занимают только часть энергетической полосы, то есть могут плавно менять свою энергию. Концентрация таких электронов в различных проводниках различна. Если поверхность одного металла коснется поверхности другого металла, то часть электронов перейдет из одного металла в другой. Во-первых, должны сравняться энергии Ферми и, во-вторых, электроны будут диффундировать из области повышенной плотности, пока возникшая разность потенциалов не остановит диффузию. Это наступит тогда, когда будет выполнено соотношение

$$n_2 = n_1 e^{\frac{e\Delta\phi}{kT}}$$

здесь  $n_1$  и  $n_2$  – концентрации свободных электронов в металлах,  $e$  – заряд электрона,  $\Delta\phi$  – разность потенциалов,  $k$  – постоянная Больцмана и  $T$  – температура. Если существуют обе причины, вызывающие контактную разность потенциалов, то

$$\phi_1 - \phi_2 = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

Если два проводника из различных металлов соединить в кольцо и контакты поддерживать при разных температурах, то по контуру потечет ток, вызванный действующей в цепи термоэдс

$$\begin{aligned} \varepsilon &= (\phi_1 - \phi_2) + (\phi_1' - \phi_2') = \\ &= \left[ \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \right] + \left[ \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} \right] = \frac{k(T_1 - T_2)}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} = \\ &= \alpha(T_1 - T_2) \end{aligned}$$

Такое явление, когда разность температур на контактах вызывает протекание тока в цепи, называется эффектом Зеебека. Для поддержания тока в цепи требуется энергия, следовательно, горячий контакт будет остывать, а холодный – нагреваться. Выделение или поглощение тепла при прохождении тока через контакт двух проводников, как уже упоминалось, называется эффектом Пельтье. Ток в цепи может быть вызван как самой термоэдс, так и сто-

ронным источником тока. Количество тепла  $Q$ , выделившееся за время  $t$  при прохождении тока  $I$ , равно

$$Q = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} It = \alpha T \cdot It = \Pi \cdot It$$

Величина  $\Pi$  называется коэффициентом Пельтье и измеряется в вольтах.

### Экспериментальная установка и ход работы.

В настоящей работе исследование эффекта Пельтье проводится на элементе Пельтье, используемом для охлаждения процессора компьютера. В дальнейшем для краткости мы будем его обозначать «ЭП».

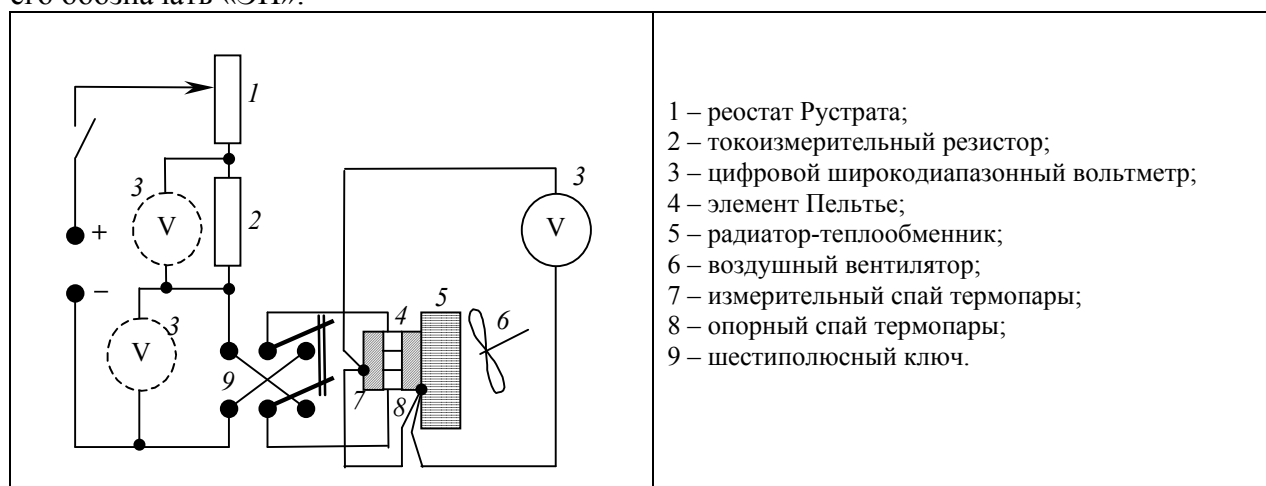


Схема установки (основной вариант исполнения)

Один из контактов ЭП 4 прижат к радиатору 5 и обдувается вентилятором 6. Разность температур контактов ЭП измеряется термопарой со спаями 7, 8. Последовательно с ЭП включено стабильное и известное токоизмерительное сопротивление 2. Таким образом, для измерения напряжения на ЭП, силы тока через него и разности температур на контактах можно использовать один широкодиапазонный вольтметр 3, который включается поочередно между различными точками схемы.

Пропустим через ЭП постоянный ток, сила которого регулируется реостатом 1, а направление через ЭП – шестиполюсным ключом 9. Один контакт будет находиться при комнатной температуре благодаря интенсивному обдуву его радиатора 5 вентилятором 6, а на втором будет устанавливаться некоторая температура, отличная от комнатной, благодаря выделению джоулева тепла и тепла Пельтье<sup>1</sup>. В итоге установится тепловое равновесие, когда количество выделяющегося тепла будет равно теплу, переходящему на первый контакт и в воздух из-за теплопроводности. Запишем уравнение теплового баланса

$$\chi \Delta T = \frac{1}{2} RI^2 + \Pi I \quad (1)$$

здесь  $\chi$  – коэффициент теплопроводности, а множитель “ $\frac{1}{2}$ ” учитывает, что джоулево тепло распределяется поровну между контактами. Разность температур между контактами

<sup>1</sup> Интенсивный обдув радиатора обеспечивает постоянство пространственной формы распределения температуры вокруг элемента Пельтье вне зависимости от полярности пропускаемого тока, без чего невозможно говорить о постоянстве условий теплоотвода, т.е. о соблюдении эмпирического закона Ньютона, описывающего теплоотвод.

измеряется термопарой. В небольшом диапазоне температур термоэдс термопары  $\varepsilon$  можно считать пропорциональной  $\Delta T$ .

$$\varepsilon = \frac{\alpha'}{\chi} \left( \frac{1}{2} RI^2 + \Pi I \right) \quad (2)$$

где  $\alpha'$  – коэффициент, описывающий термоэдс термопары.

На контактах ЭП возникает термоэдс, а с учетом падения напряжения на омическом сопротивлении<sup>2</sup> разность потенциалов на контактах будет

$$U = IR + \alpha \cdot \Delta T \quad (3)$$

( $\alpha$  – коэффициент, описывающий термоэдс элемента Пельтье) или, с учетом (1)

$$U = \left( \frac{\alpha}{\chi} \Pi + R \right) I + \frac{\alpha}{2} \chi RI^2 \quad (4)$$

Можно предположить, что в выражении (4) члены, содержащие  $\alpha$ , внесут пренебрежимо малый вклад в напряжение на обкладках ЭП (термоэдс обычно не превышают десятков милливольт), однако мы можем без значительных усложнений довести расчеты до конца в исходном виде.

Запишем уравнения (2) и (4) в общем виде

$$\begin{aligned} \varepsilon &= AI + BI^2 \\ U &= CI + DI^2 \end{aligned}$$

$$C = \frac{\alpha}{\chi} \Pi + R \quad D = \frac{\alpha}{2\chi} R$$

коэффициенты, которые можно найти из экспериментальных кривых. Исключая из уравнений  $\frac{\alpha'}{\chi}$  и

$$\frac{\alpha}{\chi}$$

$$B = \frac{AR}{2\Pi} \quad C = 2 \frac{D\Pi}{R} + R$$

и окончательно

$$R = C - \frac{AD}{B}; \quad \Pi = \frac{AC}{2B} - \frac{A^2 D}{2B^2}$$

Решение можно найти и графическим способом. Возьмем токи  $I_+$  и  $I_-$  такие, что  $I_+ = -I_-$ ; тогда

$$\Delta\varepsilon_- = \varepsilon(I_+) - \varepsilon(I_-) = 2AI$$

$$\Delta\varepsilon_+ = \varepsilon(I_+) + \varepsilon(I_-) = 2BI^2$$

Построив эти зависимости, надо убедиться, что тепло Пельтье линейно зависит от тока, а джоулево тепло – квадратично. После этого из графиков определяем коэффициенты  $A$  и  $B$ . Из аналогичных зависимостей для напряжения на контактах ЭП найдем коэффициенты  $C$  и  $D$ .

<sup>2</sup> Это сопротивление, вообще говоря, также является функцией температуры, однако эту зависимость от температуры в данной работе мы не учитываем; быть может, напрасно.

## Порядок выполнения работы.

1. Соберите схему для регулировки тока через ЭП. Для этой цели служит потенциометр, выход которого соединен с шестиполюсным ключом. Потенциометр позволяет регулировать ток от нуля до максимального, а с помощью ключа изменяется направление тока.

2. Подсоедините к источнику тока вентилятор радиатора. **Не перепутайте полярность. Если полярность будет противоположной, то вентилятор не будет вращаться и через некоторое время может сгореть.**

3. Проведите измерения, постепенно увеличивая ток от нуля до максимального. После каждого изменения тока необходимо подождать пока наступит тепловое равновесие. Многодиапазонным вольтметром измерьте термоэдс, напряжение на клеммах ЭП и напряжение на измерительном сопротивлении. Если нет многодиапазонного вольтметра, то термоэдс измеряется милливольтметром, содержащим высокочувствительный гальванометр<sup>3</sup>, последовательно с которым подключен магазин сопротивлений. Сопротивление надо подобрать таким образом, чтобы при максимальной разности температур на контактах ЭП зайчик гальванометра отклонялся на всю шкалу.

4. Для полного цикла измерений необходимо ступенями увеличить ток до максимального (порядка одного ампера), затем так же ступенями снизить его до нуля, изменить направление тока с помощью шестиполюсного ключа и повторить измерения. Не старайтесь каждый раз устанавливать одни и те же значения тока: это довольно затруднительно и приведет к большим потерям времени.

5. Обработка измерений состоит в построении графиков зависимости термоэдс и напряжения на контактах ЭП от тока. Из графиков определяются коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  которые позволяют найти сопротивление  $R$  и коэффициент Пельтье  $\Pi$ .

---

<sup>3</sup> Используется баллистический гальванометр из работы 138.