

# Работа 374

## Эффект Зеебека. Определение термо-ЭДС как функции разности температур

---

---

### Решаемые задачи

- Изучить электрические методы измерения температур;
  - Познакомиться с устройством термопары и принципами её включения в цепь;
  - Приобрести навыки работы с термопарой;
  - Проградуировать термопару;
  - Определить удельную термоэдс.
- 
-

В цепи, составленной из двух или больше разнородных металлов или полупроводников, градиенты температур вызывают появление электродвижущих сил. Электродвижущие силы возникают благодаря тепловому движению свободных электронов (или дырок) в месте контактов разнородных проводников, а также в самих проводниках. Это явление получило название *термоэлектричества*, а возникающая э.д.с. называется *термоэлектродвижущей силой* (термоэдс).



Этот эффект был открыт в 1821 Томасом Иоганном Зеебеком и носит его имя.

Эффект Зеебека лежит в основе конструкции термопары — весьма распространенного компактного, сравнительно точного, электрического метода измерения температур в диапазоне от 20 К до 1 500 К.

Количественная теория термоэлектрических явлений может быть построена только на основе квантовой механики; в рамках классической физики можно наметить только грубо качественную картину, позволяющую наглядно представить причины возникновения термоэдс, но не дающую согласия с опытом часто даже по порядку величины.

На границе двух проводников *A* и *B* вследствие теплового движения возникают встречные потоки электронов. Если число электронов в единице объема каждого проводника неодинаково, скажем,  $n_A > n_B$ , то поток из *A* в *B* буд-

дет более интенсивным, чем из *B* в *A*, и число электронов в *B* начнет возрастать. Это приведет к понижению потенциала проводника *B*, и возникшая разность потенциалов выровняет электронные потоки. Найдем разность потенциалов  $U_A - U_B$ , которая установится, когда будет достигнуто равновесие. Потенциальная энергия электронов в проводниках *A* и *B* равна, соответственно,  $-eU_A$  и  $-eU_B$ , где  $e$  — заряд электрона. Контактный слой между *A* и *B* можно рассматривать как потенциальный барьер — потенциальная энергия электронов в этом слое *W* выше, чем внутри обоих проводников. Электрон, движущийся из *A* в *B* может преодолеть барьер, если его кинетическая энергия будет больше, чем разность потенциальных энергий  $W + eU_A$  между металлом *A* и контактным слоем; концентрация таких электронов и, следовательно, число электронов, пересекающих границу раздела в единицу времени, по закону Максвелла-Больцмана, пропорциональна  $n_A e^{-(W+eU_A)/kT}$ , ( $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура). Аналогично поток электронов из *B* в *A* пропорционален  $n_B e^{-(W+eU_B)/kT}$ . Условие равенства потоков дает

$$n_A e^{-(W+eU_A)/kT} = n_B e^{-(W+eU_B)/kT}, \quad (1)$$

откуда

$$U_A - U_B = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_b}. \quad (2)$$

Если из проводников *A* и *B* составлена замкнутая цепь, оба контакта которой находятся при одинаковой температуре, то скачки потенциала на контактах одинаковы по абсолютной величине и э.д.с. в цепи равна нулю<sup>1</sup>. Если же температуры контактов  $T_1$  и  $T_2$  неодинаковы, то в цепи возникает э.д.с.

$$\mathcal{E}_{\text{конт}} = (U_A - U_B)_1 + (U_A - U_B)_2 = \frac{k}{e} (T_2 - T_1) \ln \frac{n_A}{n_b} \quad (3)$$

Направление э.д.с. ( $\mathcal{E}_{\text{конт}} > 0$  когда  $n_A > n_B$ ) легко установить, учитывая, что диффузиягонит электроны из металла, более богатого электронами, в более бедный, причем этот поток сильнее в горячем спае.

Вторая составляющая термоэдс связана с наличием градиента температуры в каждом из проводников *A* и *B*. Давление электронного газа

<sup>1</sup>Этот результат не зависит от конкретной формулы для  $U_A - U_B$ , а является следствием второго начала термодинамики: если бы в цепи из проводников первого рода (не испытывающих химических изменений при прохождении тока) все части которой имеют одинаковую температуру, существовала отличная от нуля э.д.с., эта цепь была бы вечным двигателем второго рода.

в каждой точке проводника, например  $A$ , пропорциональна температуре  $p = n_A kT$ , и градиент температуры  $dT/dx$  приводит к градиенту давления электронного газа в проводнике. Под действием этого градиента давления электроны начинают двигаться от нагретого края проводника к холодному. На каждый электрон действует, таким образом, «сторонняя» (не электрическая) сила. Отнесенная к единице заряда работа сторонних сил по перемещению электронов вдоль всего проводника  $A$  называется *электродвижущей силой*, действующей в этом проводнике  $\mathcal{E}_A$ . В классической теории идеального электронного газа величина этой э.д.с. зависит только от разницы температур на краях проводника, поэтому для всей цепи  $\mathcal{E}_A + \mathcal{E}_B = 0$  (обходя цепь по замкнутому контуру, мы идем от точки 1 к точке 2 в проводнике  $A$  и от 2 к 1 в проводнике  $B$ ). При строгом описании движения электронов в проводниках величины  $\mathcal{E}_A$  и  $\mathcal{E}_B$  зависят от рода металла или полупроводника и, как правило, полностью не компенсируются, так что полная э.д.с. в цепи будет равна:

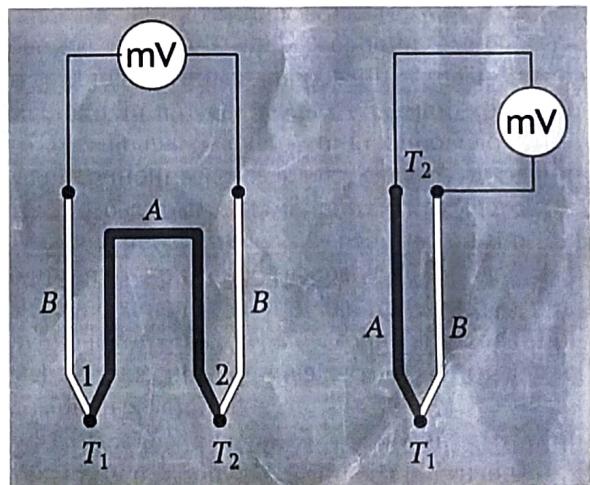
$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{конт}} + \mathcal{E}_A + \mathcal{E}_B \quad (4)$$

Формула (3) дает удовлетворительную оценку термоэдс для полупроводников, в которых концентрация свободных носителей заряда мала, так что к ним применимо классическое распределение Максвелла-Больцмана. В металлах классическое приближение совершенно непригодно. Сравнение формулы 3 с выражениями, полученными на основе квантовой механики, показывает, что классическая теория правильно предсказывает знак термоэдс ( $\mathcal{E}_{\text{конт}} > 0$  когда  $n_A > n_B$ ), но преувеличивает порядок величины. Кроме того, в классической теории  $\mathcal{E}_{\text{конт}}$  пропорционально разности температур  $T_1 - T_2$ , а в квантовой коэффициент пропорциональности сам пропорционален температуре  $T_{\text{ср}} = \frac{T_1 + T_2}{2}$ . Объемные слагаемые термоэдс в квантовой теории зависят не только от равновесных свойств электронного газа, но и от подвижности электронов; именно поэтому  $\mathcal{E}_A + \mathcal{E}_B \neq 0$ . Величина  $\mathcal{E}_A + \mathcal{E}_B$  может быть как меньше, так и больше  $\mathcal{E}$ , но обычно сравнима с  $\mathcal{E}$  по порядку величины. Знак  $\mathcal{E}_A + \mathcal{E}_B$  может не совпадать со знаком  $\mathcal{E}_{\text{конт}}$ . Поскольку разные слагаемые в формуле (4) могут иметь неодинаковую температурную зависимость, то температурный ход  $\mathcal{E}$  бывает очень сложным. Чаще всего при  $T_2 =$

$\text{const}$  зависимость  $\mathcal{E}$  от  $T_1$  изображается параболой, наклон которой растет с ростом  $T_1$ . Однако встречаются и такие пары металлов, для которых  $d\mathcal{E}/dT_1$  убывает с ростом  $T_1$  и даже меняет знак (так называемая инверсия).

Система из двух разнородных проводников, спаянных концами и дающих заметную термоэдс когда спаи имеют разные температуры, называется *термопарой* или *термоэлементом*. Первое название обычно используют, когда такая система применяется для измерения температуры, второе — к термоэлектрическим источникам энергии. Величины термоэдс для большинства металлов измеряются микровольтами на градус. Такие э.д.с. слишком малы для практического использования в качестве источников энергии, но ими очень удобно пользоваться для измерений температуры. Термопары в особенности полезны для измерения температуры в труднодоступных для обычных термометров местах или в очень малых объемах; кроме того, термопары из очень тонких проволочек мало инерционны и позволяют следить за сравнительно быстрыми изменениями температуры. Для полупроводников, к которым можно приблизенно применять формулу (3), достигимы э.д.с. порядка милливольта на градус, и полупроводниковые термоэлементы находят применение как источники электроэнергии для маломощных установок.

Схемы подключения термопар к измерительному прибору показаны на рисунке:



В реальной практике в большинстве случаев используют первую схему, где измерительный прибор включается в разрыв одного из

электродов. Подобное подключение позволяет компенсировать ненужную термоЭДС, возникающую в точках подключения электродов к проводам, ведущим к прибору. Эти точки в случае второй схемы хотя и находятся при одинаковой температуре, но соединяют разные по физическим свойствам проводники (например, медь-железо и медь-константан, если соединительные провода медные), в результате чего в них может возникать дополнительная нескомпенсированная термоЭДС, влияющая на результаты измерения. Термопара на основе такой схемы подключения называется дифференциальной.

Следует отметить, что схема подключения может содержать и большее количество спаев, чем два. Такие схемы могут использоваться для измерения, например, средней температуры объекта по нескольким точкам замера.

Для расчета суммарной термоЭДС в цепи дифференциальной термопары необходимо знать как минимум температуру одного из спаев. Раньше холодные спаи опускались в сосуды с тающим льдом для поддержания их температуры, равной 0°C (отсюда появилось название «холодные спаи»), но это очень неудобно, а для многих практических схем и вовсе невозможно. Сейчас обычно температура холодного спая контролируется дополнительным детектором (например, терморезистором).

Для изготовления измерительных термопар выбираются пары металлов или сплавов, дающие достаточно большие, стабильные и воспроизводимые термоЭДС. Для наиболее точных измерений, а также для работы при очень вы-

соких температурах (до 1700°C) применяются не очень чувствительные, но высокостабильные термопары из платины и сплава платины с родием. Большой термоЭДС и хорошей стойкостью к высоким температурам (до 1400°C) обладают термопары хромель-алюмель (сплавы никеля с хромом и алюминием). При более низких температурах (до 400°C) хорошо работает термопара медь-константан (60% Cu, 40% Ni), особенно удобная тем, что она изготавливается из хорошо распространенных электротехнических материалов. Характеристики наиболее распространенных типов термопар приведены в таблице ??, и на рисунке ??.

ТермоЭДС сильно зависит от состава проводников, а также от деталей кристаллической структуры, в частности — от наличия механических напряжений. Следовательно термопары требуют индивидуальной градуировки. Для облегчения градуировки пользуются справочными таблицами, составленными по усредненным данным для большого числа термопар данного типа.

Лабораторные термопары состоят из двух металлических проволок (*A* и *B*) диаметром сечения от 0,1 до 1,0 мм, которые для получения хорошего контакта спаяны или сварены на концах в пламени дуги. В ряде случаев для градуировки термопар используют некоторые заранее известные значения температур (реперные точки). Например, в качестве реперных точек принимают температуры таяния льда (0°C = 273 K), кипения воды (100°C = 373 K), кипения жидкого азота (-196°C = 77 K).

Таблица 1. Характеристики наиболее распространенных типов термопар.

Тип	Материал термоэлектродов положительного отрицательного	Удельная термоЭДС, мВ/°C (в диапазоне температур, °C)	Диапазон температур, °C	
J	Железо (Fe)	Константан	50-64 (0-800)	от -200 до +750
K	Хромель	Алюмелъ	35-42 (0-1300)	от -200 до +1200
T	Медь (Cu)	Константан	40-60 (0-400)	от -200 до +350
E	Хромель	Константан	59-81 (0-600)	от -200 до +700
L	Хромель	Копель	64-88 (0-600)	от -200 до +600
R	Платина-родий	Платина (Pt)	10-14 (600-1600)	от 0 до +1300

- Константан — сплав 45% Cu + 45% Ni, Mn, Fe.
- Хромель — сплав 90,5% Ni + 9,5% Cr.
- Алюмелъ — сплав 94,5% Ni + 5,5% Al, Si, Mn, Co.
- Копель — сплав 56% Cu + 44% Ni.
- Платина-родий — сплав 87% Pt + 13% Rh.

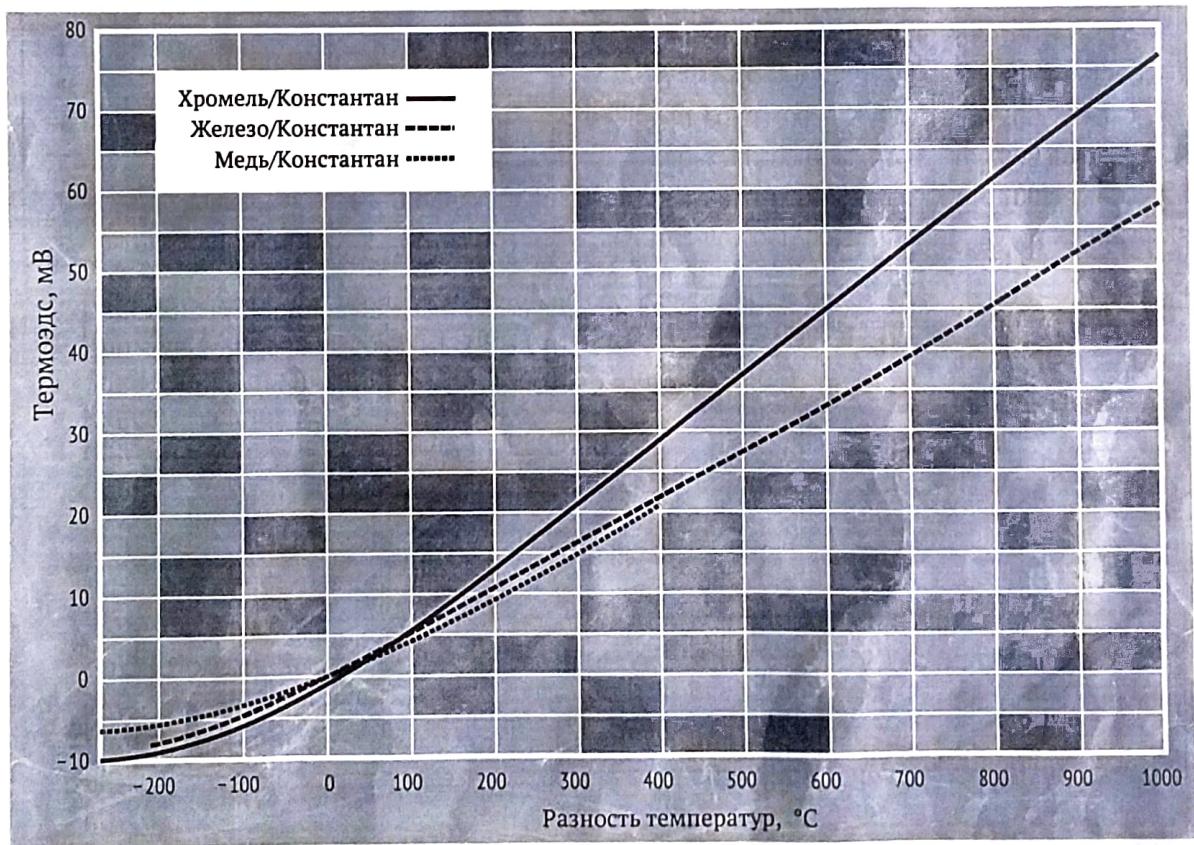


Рис. 1. Зависимость термоэдс от разности температур спаев для некоторых типов термопар.

## Описание эксперимента

В работе необходимо измерить величину термоэдс в зависимости от разности температур  $\Delta T$  между двумя точками контакта для термопар составленных из разнородных металлов *A* и *B*: железо/константан, медь/константан и хромель/константан.

Каждая термопара находится в своей пробирке, заполненной маслом. Точка контакта двух металлов нагревается при помощи электрического нагревателя  $R_H$ , а концы проводников находятся при комнатной температуре  $T_2$  и соединены с одинаковыми медными проводами, при помощи которых термопара подключена к милливольтметру. Температуру  $T_1$  можно измерить при помощи жидкостного термометра.

Подключение термопар к милливольтметру и включение нагревателя производится при помощи кнопок на передней панели прибора.

Получив экспериментальную зависимость термоэдс  $\mathcal{E}$  от разности температур ( $T_1 - T_2$ ) по наклону графика зависимости можно определить удельную термоэдс:

$$\alpha = \frac{d\mathcal{E}}{dT} \quad (5)$$

Удельная термоэдс — это термоэдс, возникающая между спаями при разности температур 1 К. Она зависит от материала спаев и температуры. Для большинства пар металлов удельная термоэдс имеет значения ( $10^{-5} \div 10^{-4}$ ) В/К, для полупроводниковых материалов до  $-10^{-3}$  В/К.

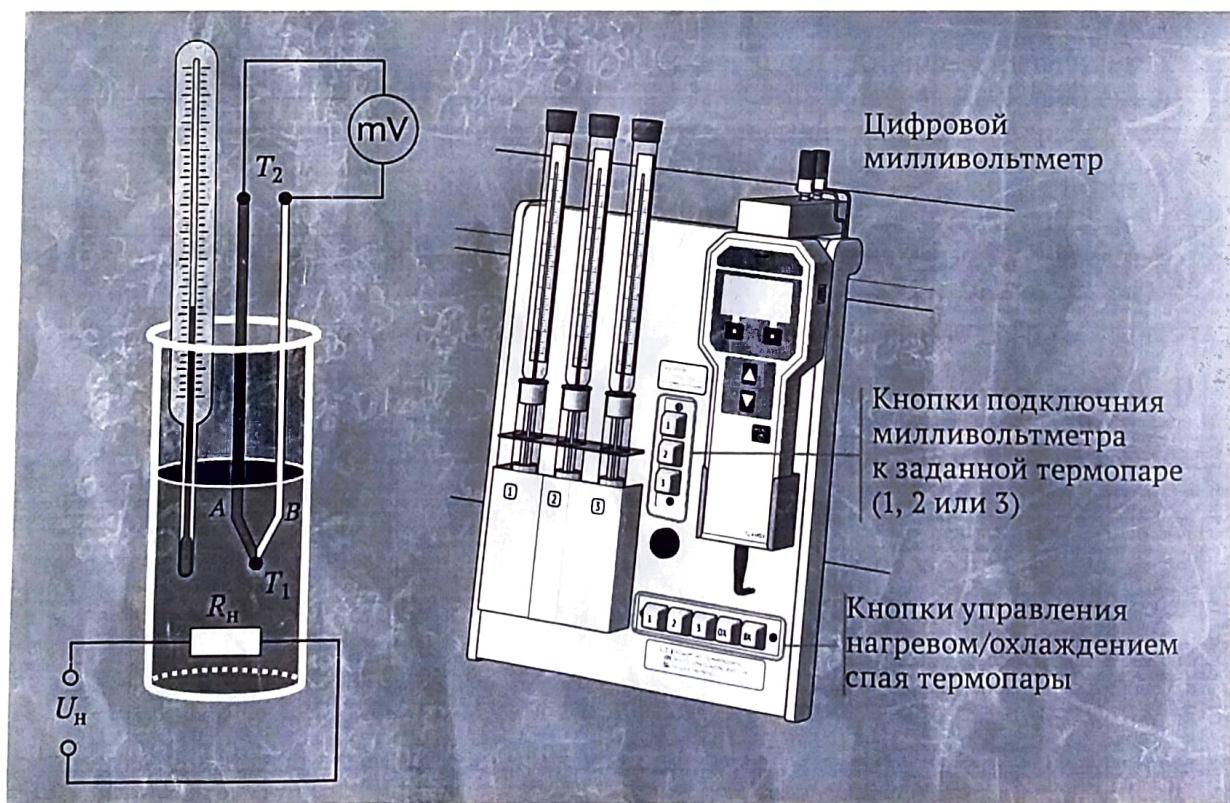


Рис. 2. Экспериментальная установка для изучения эффекта Зеебека.

## Оборудование

Электронный индикатор Mobile-CASSY .....	1 шт.	524009
Милливольтметр .....	1 шт.	524040
Прибор для изучения термоэдс .....	1 шт.	

## Порядок выполнения работы

- Включить экспериментальную установку (кнопка **(вк)**) и милливольтметр.
- Подключить исследуемую термопару<sup>2</sup> к милливольтметру, нажав одну из кнопок **(1)–(3)** слева от Mobile-CASSY.
- Записать начальное значение температуры  $T_2$  для выбранной термопары.
- Записать начальное показание милливольтметра  $\mathcal{E}$  при комнатной температуре  $T_2$ .
- Включить нагреватель для выбранной термопары, нажав соответствующую кнопку **(1)–(3)** снизу от Mobile-CASSY.
- Через каждые  $5 \div 8$  градусов записывать показания стеклянного термометра  $T_1$  и милливольтметра  $\mathcal{E}$ . Результаты измерений занести в таблицу. Измерения продолжать до тех пор, пока температура не достигнет значения  $100 \div 120^\circ\text{C}$ .

$T_1, {}^\circ\text{C}$	$\Delta T = T_1 - T_2$	Термоэдс $\mathcal{E}$ , мВ		
		нагрев	охлаждение	среднее
...				

- Выключить нагреватель, нажав кнопку **(ox)**.
- Во время охлаждения термопары, для тех же значений температуры, что и при нагревании, снять показания милливольтметра  $\mathcal{E}$  и занести их в таблицу. Измерения продолжать до тех пор, пока температура не достигнет значения  $20 \div 30^\circ\text{C}$ .
- По указанию преподавателя, повторить измерения для другой термопары.

<sup>2</sup>Указание, какую именно термопару нужно исследовать, дает преподаватель или инженер лаборатории.

## Обработка результатов

- Для всех измеренных значений температуры рассчитать разницу температур  $\Delta T = T_1 - T_2$  и занести в таблицу.
- Для всех измеренных значений температуры рассчитать среднее значение  $\mathcal{E} = (\mathcal{E}_{\text{нагр}} + \mathcal{E}_{\text{охл}})/2$  и занести в таблицу.
- Построить график зависимости  $\mathcal{E}(\Delta T)$ .
- По тангенсу угла наклона графика  $\mathcal{E}(\Delta T)$  определить значение удельной термоэдс  $\alpha$  для начальной и конечной части графика. Сравнить значения  $\alpha$ , вычисленные для различных интервалов температур, между собой. Определить материал термопары. Сопоставить экспериментальные и теоретические значения удельных термоэдс  $\alpha$ .
- Объясните полученные результаты.

## Вопросы для подготовки

1. Электропроводность металлов. Классическая электронная теория проводимости.
2. Элементы зонной теории проводимости твердых тел. Понятие об уровнях энергии и энергетических зонах в твердом теле.
3. Энергия Ферми. Контактная разность потенциалов.
4. Термоэлектрические явления. Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона.
5. Применение термопар для измерения температуры.