

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич  
Должность: ректор  
Дата подписания: 16.04.2022 10:39:26  
Уникальный программный ключ:  
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра нанотехнологий, общей и прикладной физики



### ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ТЕРМОЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Методические указания к лабораторной работе № 45 по разделу «Электричество и магнетизм» для студентов направлений подготовки 28.03.01. «Нанотехнологии и микросистемная техника», 03.03.02 «Физика», 04.03.01. «Химия», 18.03.01. «Химическая технология»

Курск – 2019

УДК 537.32

Составители: Н.М. Игнатенко, В.В.Сучилкин

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент *А.Е. Кузько*

**Изучение эффекта термоэлектродвижущей силы [Текст]:** Методические указания к лабораторной работе №45 по разделу «Электричество и магнетизм». Для студентов направлений подготовки 28.03.01. «Нанотехнологии и микросистемная техника», 03.03.02 «Физика», 04.03.01. «Химия», 18.03.01. «Химическая технология / Юго-Зап.. гос. ун-т; сост.: В.М. Пауков, В.В. Сучилкин. Курск, 2019. 11 с., рис. 4, табл.1. Библиогр.: с. 10

Содержит сведения о причинах возникновения термоэлектродвижущей силы. Излагаются методические рекомендации для измерения термоэлектродвижущей силы и определения постоянной хромель-алюмелевой термопары с мультиметра. Указывается порядок выполнения работы.

Методические указания соответствуют требованиям Федеральных образовательных стандартов высшего профессионального образования (ФГОС), Федерального компонента цикла общих математических и естественнонаучных дисциплин, а также рабочим учебным планам и рабочим программам по курсам разделов общей физики всех инженерно-технических специальностей (направлений) подготовки ЮЗГУ.

Для студентов направлений подготовки 28.03.01. «Нанотехнологии и микросистемная техника», 03.03.02 «Физика», 04.03.01. «Химия», 18.03.01. «Химическая технология»

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 24.01.19. Формат 60×84 1/16.

Усл.печ.л. 0,5. Уч.-изд.л. 0,4 Тираж 100 экз. Заказ 31. Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## Лабораторная работа № 45

**Изучение термоэлектродвижущей силы**

Цель работы: 1. Изучить устройство и принцип действия термоэлемента.

2. Определить коэффициент термоэлектродвижущей силы (постоянную термопары).

Приборы и принадлежности: Термопара хромель-алюмелевая, электроплитка, два сосуда с водой, термометр, мультиметр.

**Краткая теория**

Сущность явления термо-Э.Д.С. состоит в том, что в замкнутой цепи, составленной из разных металлов, возникает электрический ток, если места контактов поддерживаются при различной температуре (см. рис.1). Такая цепь носит название термоэлемента или термопары.

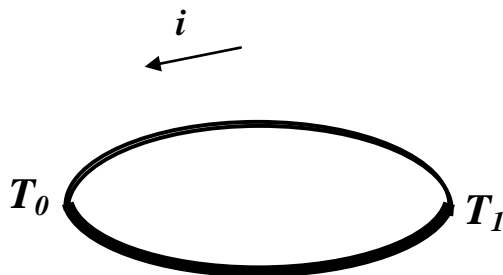


Рис. 1 Цепь термоэлемента

Для небольших интервалов температур величина термо-Э.Д.С.  $\mathcal{E}$  пропорциональна разности температур контактов  $T_0$  и  $T_1$ : где  $\alpha_{1,2}$  - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом термопары

$$\mathcal{E} = \alpha_{1,2}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

Его величина определяется в основном металлами, составляющими термопару, и слабо изменяется с температурой. Для металлов  $\alpha_{1,2} = 3 \times 10^{-6} \div 2 \times 10^{-5}$  В/К, для полупроводников  $\alpha_{1,2} = 10^{-4} \div 5 \times 10^{-4}$  В/К.

Рассмотрим причины возникновения указанного эффекта. Каждая ветвь термопары состоит из очень большого числа частиц и представляет термодинамическую систему, находящуюся из-за градиента температуры в неравновесном состоянии. Поэтому при обсуждении следует исходить из законов физической кинетики (термодинамики неравновесных процессов).

Как показывает опыт, поток какой-либо физической величины (тепла – при теплопроводности, массы – при диффузии, заряда – при протекании тока и т.д.) определяется градиентами некоторых термодинамических величин. Роль термодинамических величин выполняют температура, электрохимический и химический потенциалы, кинетическая энергия, концентрация и т.д.

Например, дифференциальная форма закона Ома фиксирует связь между плотностью потока носителей зарядов (плотностью тока  $j$ ) и напряженностью электрического поля  $E$ , равной градиенту потенциала  $(-d\varphi/dl)$ :

$$j = \sigma E = -\sigma(d\varphi/dl),$$

где  $\sigma$  - удельная электропроводность.

Аналогичную форму имеет закон Фурье для плотности теплового потока  $q$ :

$$q = -\lambda(dT/dl),$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $-\frac{dT}{dl}$  - градиент температуры.

Применим изложенные положения к неравномерно нагретому проводнику (ветви термопары). При нагреве в его горячей части средняя кинетическая энергия частиц  $\langle k \rangle$  возрастет, а электрохимический потенциал  $\mu$  уменьшится по отношению к холодной области ( $\mu$  - электрохимический потенциал численно равный свободной энергии в расчете на один электрон). Возникшие при этом градиенты средней энергии  $\langle k \rangle$  и электрохимического потенциала создадут два встречных потока электронов: градиент энергии – из горячей зоны, где скорости электронов выше, в холодную; градиент электрохимического потенциала – из холодной зоны в горячую. Возникающая при этом результирующая плотность тока будет пропорциональна разности указанных градиентов:

$$j = L(d\langle K \rangle / dl) - L(d\mu / dl), \quad (2)$$

где  $L$  - коэффициент пропорциональности (из опыта следует, что он одинаков при обоих слагаемых).

Для большинства металлов изменение электрохимического потенциала при нагреве оказывается меньше изменения энергии. Поэтому поток электронов в холодную зону будет доминировать и зарядит ее отрицательно. Это приведет к росту электрохимического потенциала в холодной зоне за счет увеличения слагаемого  $e\varphi$ , так как электрохимический потенциал

$$\mu = \xi + e\varphi, \quad (3)$$

где  $\xi$  - химический потенциал,  $e$  - заряд электрона,  $\varphi$  - потенциал электрического поля, созданного избыточными зарядами. Градиент потенциала при этом возрастает, и усиливается поток электронов в горячую зону. Когда встречные потоки электронов сравняются (стационарное состояние), между холодной и горячей частями проводника установится разность потенциалов  $\Delta\varphi$ .

Подстановка уравнения (3) в уравнение (2) дает для стационарного состояния ( $j=0$ )

$$0 = L \cdot \frac{d\langle k \rangle}{dl} - L \cdot \left( \frac{d\xi}{dl} + e \cdot \frac{d\varphi}{dl} \right) \quad (4)$$

Учитывая что  $-(d\varphi/dl)=E$  из уравнения (4) получаем:

$$E = \frac{1}{e} \cdot \left( \frac{d\xi}{dl} - \frac{d\langle k \rangle}{dl} \right) \quad (5)$$

По определению э.д.с. разомкнутой цепи численно равна разности потенциалов на концах последней:

$$\varepsilon = \int_l d\varphi = \int_l -Edl = \frac{1}{e} \int_l \left( \frac{d\langle k \rangle}{dl} - \frac{d\xi}{dl} \right) \cdot dl = \frac{1}{e} \int_l (d\langle k \rangle - d\xi) \cdot \frac{dT}{dT} = \frac{1}{e} \int_{T_0}^T \left( \frac{d\langle k \rangle}{dT} - \frac{d\xi}{dT} \right) \cdot dT \quad (6)$$

Определяя дифференциальную термо-э.д.с. для однородной ветви термопары как

$$\alpha = \frac{1}{e} \cdot \left( \frac{d\langle k \rangle}{dT} - \frac{d\xi}{dT} \right)$$

получаем:

$$\mathcal{E} = \int_{T_0}^T \alpha(T) dT,$$

где  $\alpha(T)$  является сложной функцией металла и температуры. Поэтому в двух ветвях термопары из разных металлов (рис. 1) возникнут два термо-э.д.с. и результирующая будет по второму правилу Кирхгофа равна алгебраической сумме  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ :

$$\mathcal{E}_{1,2} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = \int_{T_0}^T \alpha_1 dT + \int_{T_1}^{T_0} \alpha_2 dT = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_1 dT - \int_{T_0}^{T_1} \alpha_2 dT = \int_{T_0}^{T_1} (\alpha_1 - \alpha_2) dT \quad (7)$$

Величину  $(\alpha_1 - \alpha_2)$  обозначают символом  $\alpha_{1,2}$  и называют дифференциальной термо-э.д.с. термопары или коэффициент термопары. В результате уравнение (7) примет вид:

$$\mathcal{E}_{1,2} = \int_{T_0}^{T_1} \alpha_{1,2} dT \quad (8)$$

Можно подобрать такие пары металлов, для которых  $\alpha_{1,2}$  будет значительной по величине и слабо зависящей от температур. В этом случае формула (8) сводится к эмпирической зависимости (1):

$$\mathcal{E}_{1,2} = \alpha_{1,2} \int_{T_0}^{T_1} dT = \alpha_{1,2} (T_1 - T_2) \quad (9)$$

Термопары удобно использовать для точного измерения температур, а термоэлементы из многих последовательно включенных ветвей (рис. 2) для получения токов до 1 А мощностью до сотен ватт.

### Описание установки

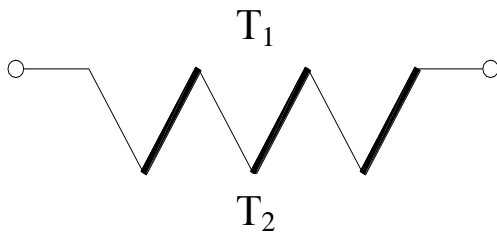


Рис. 2 Соединение термоэлементов

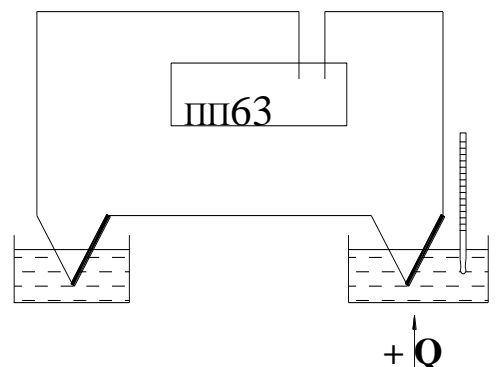


Рис.3 Схема установки

Для определения термо-э.д.с. и коэффициента термопары собирается схема, показанная на рис. 3.

Спай термопары помещаются в сосуды с водой. Один из них ставится на электроплитку. Температура спаия  $t_1$  в этом сосуде изменяется в процессе нагревания и измеряется термометром, шарик которого нужно помещать возможно ближе к спаю термопары. Температура второго спаия  $t_0$  остается постоянной и равной комнатной (измеряется термометром один раз в начале эксперимента). Так существуют различные способы измерения ЭДС термопары. Например ЭДС термопары с большой точностью измеряется потенциометром постоянного тока ПП-63.

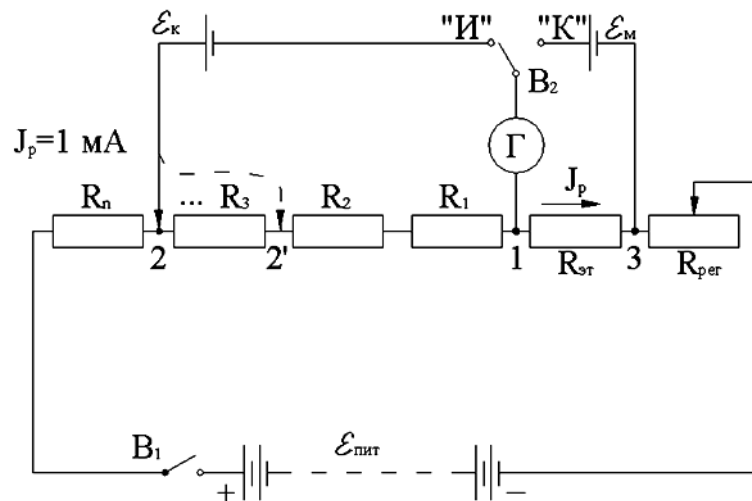


Рис. 4 Принципиальная схема установки

Потенциометр ПП-63 предназначен для измерений электродвижущих сил или разности потенциалов методом компенсации. Его устройство, в принципе, ничем не отличается от обычной компенсационной схемы с нормальным элементом Вестона в качестве эталона. На панели потенциометра смонтированы сопротивления, нуль-гальванометр и переключатель на два положения (положение "К" – для установки рабочего тока потенциометра. "И" – для измерения неизвестной э.д.с. или разности потенциалов).

Внутри корпуса размещен элемент Вестона, источники питания потенциометра, состоящие из щелочных аккумуляторов или сухих батарей (см. рис. 4).

## Порядок выполнения работы

1) Устанавливают рабочий ток потенциометра. Для этого ставят выключатель  $B_1$  в положение “Вкл”, а переключатель  $B_2$  в положение “К”. При этом ток от источника питания  $\mathcal{E}_{\text{пит}}$  проходит через известное эталонное сопротивление  $R_{\text{эт}}$ . Поворотом ручки “Регулятор тока” меняют сопротивление  $R_{\text{рег}}$  в цепи источника тока  $\mathcal{E}_{\text{пит}}$ , добиваясь нулевого показания гальванометра. Э.Д.С. элемента Вестона ( $\mathcal{E}_m = 1.01830 \text{ В} \pm 4.0 \cdot 10^{-5} \text{ В}$  при  $t=20^\circ\text{C}$ ) компенсируется в этом случае разностью потенциалов, создаваемой током источника на эталонном сопротивлении  $R_{\text{эт}} = 1018.3 \text{ Ом}$ .

Действительно, по II правилу Кирхгофа для контура “ИКЗГ” можно составить уравнение  $J_p R_{\text{эт}} = \mathcal{E}_m$  (напоминаем, что при компенсации ток в ветви “ИКЗ” не идет, о чем свидетельствуют показания гальванометра). Однако, по закону Ома  $J_p R_{\text{эт}} = \Delta\phi$ , где  $\Delta\phi$  – разность потенциалов на резисторе  $R_{\text{эт}} \Rightarrow \Delta\phi = \mathcal{E}_m$

Таким образом  $J_n = \frac{\mathcal{E}_m}{R_{\text{эм}}} = \frac{1.01830}{1018.3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 1 \text{ мА}$

2) После того, как рабочий ток установлен, переключатель  $B_2$  ставят в позицию “И”, подключая при этом источник тока с неизвестной Э.Д.С. ( в нашем случае неизвестной Э.Д.С. является Э.Д.С. термопары) параллельно измерительным декадам, составленным из известных сопротивлений в 1, 10, 100 Ом и т.д. Вращением рукояток измерительных декад изменяют сопротивление участка “1-2”, добиваясь компенсации  $\mathcal{E}_k$  разностью потенциалов на известных сопротивлениях этого участка ( по участку 1-2 в момент компенсации  $\mathcal{E}_k$  течет ток  $J_p = I \text{ мА}$ ):

$$\mathcal{E}_k = J_p R_{1-2}, \text{ где } R_{1-2} = R_1 + R_2 + \dots$$

здесь  $R_1$   $R_2$  и т.д. сопротивление декад участка 1-2.

Например, для компенсации  $\mathcal{E}_k$  на участке 1-2 были включены резисторы общим сопротивлением 0.18 Ом. Тогда, из приведенных выше формул следует, что  $\mathcal{E}_k = 0.18 \cdot 0.001 = 1.8 \cdot 10^{-4} \text{ В} = 0.18 \text{ мВ}$ . Все это позволяет при неизменном рабочем токе  $J = I \text{ мА}$  (при обоих положениях переключателя  $B_2$  сопротивление контура “ $\mathcal{E}_{\text{пит}}, 3, 2, \mathcal{E}_{\text{пит}}$ ” (см. рис.4 ) неизменно, ибо в ветвях  $\mathcal{E}_k$   $\mathcal{E}_m$  ток при компенсации не идет) градуировать шкалы декад, не в омах, а в милливольт-тах, вольтах и т.д. ЭДС термопары так же можно измерять мульти-



метром, который имеет большую погрешность измерения чем потенциометр.

В данной работе ЭДС термопары измеряется мультиметром.

### Задания

Задание 1. Построение градуировочного графика термопары.

1. После сборки и проверки схемы включить мультиметр, убедиться предварительно, что температура в обоих сосудах одинакова.

2. Занести в таблицу значение  $t_0$  – температуру холодного спая.

3. Установить термометр в сосуде, поставленном на электроплитку так, чтобы шарик его был возможно ближе помещен к спаю термопары.

4. Включить нагреватель и в интервале температур  $20 \div 100^\circ\text{C}$  при  $8 \div 10$  различных значениях температуры  $t_1$  измерить  $\mathcal{E}_k$ .

5. Показания термометра и ММ следует снимать при уравновесившемся тепловом равновесии (когда столбик ртути термометра перестанет подниматься вверх), что достигается периодическим отключением электроплитки от сети за  $2-3^\circ$  до намеченной температуры на одну-две минуты.

6. Результат измерения занести в таблицу.

7. Построить по данным эксперимента градуировочный график термопары  $\varepsilon_x = f(T)$  в координатах " $\varepsilon_x - T$ ".

Таблица 1. Результаты измерений

№ п/п	$t_0^\circ\text{C}$	$t_1^\circ\text{C}$	$(t_1-t_0)^\circ\text{C}$	$\mathcal{E}_k$ , мВ
1				
2				
...				
10				

Задание 2. Определение постоянной термопары

1. Определить координаты центра графика  $\varepsilon_{xy}$  и  $t_y$ .

2. Вычислить приращения  $t_u - t_0$ ,  $t_{\max} - t_u$ ,  $t_{\max} - t_0$  и отвечающие им приращения  $\Delta\varepsilon_x$ .

3. По формуле  $\alpha_{1,2} = \Delta\varepsilon/\Delta t$  для указанных трех температурных промежутков вычислить три значения постоянной термопары.

4. Рассчитать среднее значение, абсолютную и относительную погрешности постоянной термопары.

### Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект термо-э.д.с.?
2. Выведите формулу (7).
3. Расскажите о причинах возникновения термо-э.д.с.
4. Выведите расчетную формулу для определения постоянной термопары.
5. Изложите порядок выполнения работы.
6. Расскажите о практических приложениях эффекта термо-э.д.с.

### Список рекомендуемой литературы

#### *Основной*

1. Любая С.И. Физика: курс лекций [Электронный ресурс]. / С.И.Любая - Ставрополь - Ставропольский государственный аграрный университет, 2015. - 141 с.

Режим доступа [//biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438720](http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438720)

2. Кузнецов С.И. Курс лекций по физике. Электростатика. Постоянный ток. Электромагнетизм. Колебания и волны [Электронный ресурс] : учебное пособие / С.И.Кузнецов, Л.И.Семкина, К.И.Рогозин. - Томск: - Издательство Томского политехнического университета, 2016. - 290 с.

Режим доступа [//biblioclub.ru/index.php?page=book&id=442116](http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=442116)

#### *Дополнительный*

1. Кабардин, О. Ф. Физика [Текст] : справочные материалы: Учебное пособие для учащихся. Механика. Молекулярная физика. Электродинамика. Колебания и волны. Квантовая физика. Прило-

жения / О. Ф. Кабардин. - 3-е изд. - М. : Просвещение, 1991. - 367 с. : ил. - Б. ц.

2. Полунин, В. М. Физика. Основные понятия и законы [Текст] : учебно-методическое пособие / В. М. Полунин, Г. Т. Сычев. - Курск : КГТУ, 2002. - 156 с. - 40.00 р.

3. Федосеев, Владимир Борисович. Физика [Текст] : учебник / В. Б. Федосеев. - Ростов н/Д. : Феникс, 2009. - 669 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-222-149 83-6 : 320.00 р.