

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Техническая физика»

**ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

Методические указания
к лабораторной работе

МИНСК 2010г.

УДК 53.082.62(076.5)(075.8)
ББК 30.10я7
ИЗ7

С о с т а в и т е л и:

*М.А. Князев, Д. А. Русакевич, Е. Е. Трофименко,
А. В. Федотенко, Н. В. Францкевич*

Р е ц е н з е н т:

доцент кафедры физики,
канд. физ.-мат. наук Н.П.Юркевич

В методических указаниях рассматриваются общая характеристика термоэлектрических явлений в твердых телах, механизм формирования термоэдс, принципиальное устройство термопар и указаны основные области их практического применения. Дается описание способов градуировки термопар. В работе приводится описание метода определения коэффициента термоэдс материала.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучить основные механизмы возникновения термоэдс и принципы действия термоэлементов.
2. Изучить области практического применения термоэдс.
3. Освоить методы градуировки термоэлемента и измерения термоэдс в зависимости от температуры.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ:

1. Какие явления относятся к термоэлектрическим?
2. Что называется контактной разностью потенциалов?
3. Объясните механизм возникновения контактной разности потенциалов.
4. В чем заключается эффект Зеебека, эффект Пельтье и эффект Томсона?
5. Каковы причины возникновения термоэдс?
6. Устройство и принцип действия термопары.
7. Что такое коэффициент термоэдс термопары и коэффициент термоэдс материала?
8. Методы градуировки термопар.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

К термоэлектрическим явлениям относятся явления прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, а также обратные им явления охлаждения или нагревания проводников электрическим током.

Если составить замкнутую цепь из двух спаянных разнородных проводников, то в каждом из спаев установится контактная разность потенциалов. Контактные разности потенциалов будут одинаковы и противоположны по знаку, если во всех точках цепи температура будет одинаковой. Ток в цепи будет равен нулю, а система в целом будет находиться в состоянии термодинамического равновесия. Это равновесие будет нарушено, если нагреть или охладить один из спаев. Контактные разности потенциалов разных спаев не будут компенсировать друг друга. В результате по цепи потечет электрический ток.

К термоэлектрическим явлениям относится эффект Зеебека, эффект Пельтье и эффект Томсона. Общей причиной термоэлектрических явлений является нарушение теплового равновесия в потоке носителей электрических зарядов.

1.1 КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Явление возникновения контактной разности потенциалов было обнаружено итальянским физиком А. Вольта, который установил, так называемый ряд Вольта для металлов: Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd. Каждый предыдущий металл при соприкосновении с одним из последующих приобретает положительный электрический заряд. Величина контактной разности потенциалов изменяется от нескольких десятых до нескольких вольт.

Контактная разность потенциалов зависит от химического состава и температуры соприкасающихся металлов. Она сильно изменяется даже при незначительных загрязнениях соприкасающихся поверхностей или их окислении.

При последовательном соединении нескольких проводников при одинаковой температуре контактная разность потенциалов не зави-

сит от химического состава промежуточных проводников и равна контактной разности потенциалов между крайними проводниками.

Рассмотрим эти закономерности в рамках классической электронной теории металлов. При соприкосновении двух разных металлов с работами выхода A_1 и A_2 (считаем что $A_1 < A_2$), электроны, находящиеся у поверхности раздела металлов, вследствие теплового движения будут переходить из металла с меньшей работой выхода в металл, для которого работа выхода больше. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока работа по перемещению электронов за счет контактной разности потенциалов $\varphi_1' - \varphi_2'$ не станет равной разности работ выхода:

$$e(\varphi_1' - \varphi_2') = A_2 - A_1 \quad (1)$$

где e – заряд электрона.

Еще одной причиной возникновения контактной разности потенциалов является различная концентрация электронов в металле. Если n_1 и n_2 – концентрации электронов в первом и втором металлах и $n_1 > n_2$, то будет происходить преимущественный перенос электронов из первого металла во второй. В результате первый металл приобретет положительный заряд, а второй отрицательный, что приведет к разности потенциалов.

$$\varphi_1'' - \varphi_2'' = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Как правило $\varphi_1' - \varphi_2' \gg \varphi_1'' - \varphi_2''$.

Результирующая контактная разность потенциалов равна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -(A_1 - A_2) / e + \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (3)$$

Рассмотрим случай, когда в соприкосновение приведены три разных проводника, находящихся при одинаковой температуре.

Разность потенциалов между концами разомкнутой цепи будет равна алгебраической сумме скачков потенциалов во всех контактах:

$$\varphi_1 - \varphi_3 = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) \quad (4)$$

откуда используя соотношения (1) и (2) получаем:

$$\varphi_1 - \varphi_3 = -(A_1 - A_3)/e + \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_1}{n_3}\right) \quad (5)$$

Как видно, контактная разность потенциалов не зависит от промежуточного проводника.

Если замкнуть электрическую цепь, представленную на рисунке 1, то приложенная эдс ε будет равна алгебраической сумме всех скачков потенциалов, которые имеют место при обходе цепи:

$$\varepsilon = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + (\varphi_3 - \varphi_1) \quad (6)$$

откуда следует, что $\varepsilon=0$.

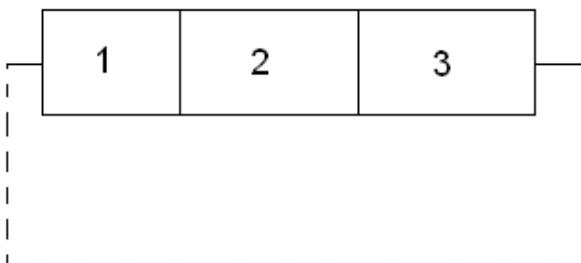


Рис. 1 Соединение трех различных проводников

Таким образом, при образовании замкнутой электрической цепи из нескольких металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, эдс за счет контактной разности потенциалов не возникает. Чтобы ток возник, спаи проводников должны находиться при разных температурах.

Контактная разность потенциалов возникает не только между двумя металлами, но также и между двумя полупроводниками, металлом и полупроводником, двумя диэлектриками.

1.2 ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Известно, что работа выхода электронов из металла зависит от температуры. Следовательно, контактная разность потенциалов также зависит от температуры. Если температура контактов замкнутой цепи, состоящей из нескольких металлов, неодинакова, то полная эдс контура не будет равна нулю, и в цепи возникает электриче-

ских ток. Явление возникновения термоэлектрического тока (эффект Зеебека) и связанные с ним эффекты Пельтье и Томсона относятся к термоэлектрическим явлениям.

ЭФФЕКТ ЗЕЕБЕКА

Эффект Зеебека заключается в возникновении электрического тока в замкнутой цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников, контакты между которыми имеют различную температуру. Этот эффект был обнаружен немецким физиком Т. Зеебеком в 1821 году.

Рассмотрим замкнутую цепь, состоящую из двух проводников 1 и 2 с температурами спаев T_A (контакт А) и T_B (контакт В), представленную на рисунке 2.

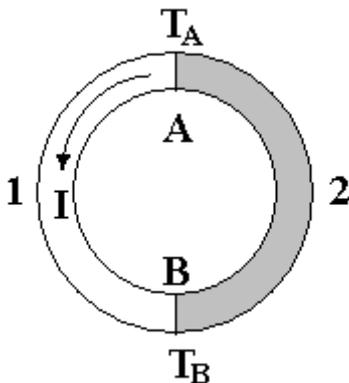


Рис.2

Считаем, $T_A > T_B$. Электродвижущая сила \mathcal{E} , возникающая в данной цепи, равна сумме скачков потенциалов в обоих контактах:

$$\mathcal{E} = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7)$$

Используя соотношение (3), получим:

$$\mathcal{E} = (T_A - T_B) \frac{k}{e} \ln \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (8)$$

Следовательно, в замкнутой цепи возникает эдс, величина которой прямопропорциональна разности температур на контактах. Это и есть термоэдс.

Качественно эффект Зеебека можно объяснить следующим образом. Сторонние силы, создающие термоэдс, имеют кинетическое происхождение. Так как электроны внутри металла свободны, то их можно рассматривать как некоторый газ. Давление этого газа должно быть одинаковым по всей длине проводника. Если разные сечения проводника имеют разные температуры, то для выравнивания давления требуется перераспределение концентрации электронов. Это и приводит к возникновению тока.

Направление тока I , указано на рис. 2, соответствует случаю $T_A > T_B$, $n_1 > n_2$. Если изменить знак у разности температур контактов, то направление тока измениться на противоположное.

ЭФФЕКТ ПЕЛЬТЬЕ

Эффектом Пельтье называется явление выделения или поглощения дополнительной теплоты, помимо джоулева тепла, в контакте двух различных проводников в зависимости от направления, по которому течет электрический ток. Эффект Пельтье является обратным по отношению к эффекту Зеебека. Если джоулево тепло прямопропорционально квадрату силы тока, то теплота Пельтье прямопропорциональна силе тока в первой степени и меняет свой знак при перемене направления тока.

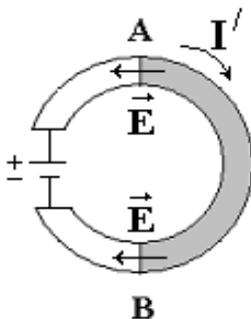


Рис. 3

Рассмотрим замкнутую цепь, состоящую из двух различных металлических проводников, по которой течет ток I' (Рис. 3). Пусть направление тока I' совпадает с направлением тока I , показанного

на рис. 2 для случая $T_B > T_A$. Контакт А, который в эффекте Зеебека имел бы более высокую температуру, теперь будет охлаждаться, а контакт В – нагреваться. Величина тепла Пельтье определяется соотношением:

$$Q = \Pi \cdot I' \cdot t,$$

где I' – сила тока, t – время его пропускания, Π – коэффициент Пельтье, который зависит от природы контактирующих материалов и температуры.

Из-за наличия контактных разностей потенциалов в точках А и В возникают контактные электрические поля с напряженностью \vec{E} . В контакте А это поле совпадает с направлением движения электронов, а в контакте В электроны движутся против поля \vec{E} . Так как электроны заряжены отрицательно, то в контакте В они ускоряются, что приводит к увеличению их кинетической энергии. При столкновениях с ионами металла эти электроны передают им энергию. В результате повышается внутренняя энергия в точке В и контакт нагревается. В точке А энергия электронов наоборот уменьшается, поскольку поле \vec{E} тормозит их. Соответственно контакт А охлаждается, т.к. электроны получают энергию от ионов в узлах кристаллической решетки.

ЭФФЕКТ ТОМСОНА

Эффект Томсона состоит в том, что при прохождении тока по неравномерно нагретому проводнику происходит дополнительное выделение или поглощение теплоты, аналогично тому, как это имеет место в эффекте Пельтье.

Поскольку различные участки проводника нагреты неодинаково, то и их физические состояния различаются. Неравномерно нагретый проводник ведет себя как система находящихся в контакте физически разнородных участков. В более нагретой части проводника энергия электронов выше, чем в менее нагретой. Поэтому в процессе движения они отдают часть своей энергии ионам металла в узлах кристаллической решетки. В результате происходит выделение тепла. Если же электроны движутся в область, где температура выше, то они увеличивают свою энергию за счет энергии ионов, и металл охлаждается.

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Эффект Зеебека широко используется в устройствах для измерения температуры и устройствах прямого преобразования тепловой энергии в электрическую. Простейшее такое устройство состоит из двух последовательно соединенных пайкой или сваркой разнородных металлических проводников М1 и М2. Такая цепь называется термоэлектрическим преобразователем (термопарой), составляющие термопару проводники – электродами, места их соединения – спаями. На рис.4 представлены типичные схемы включения термопары.

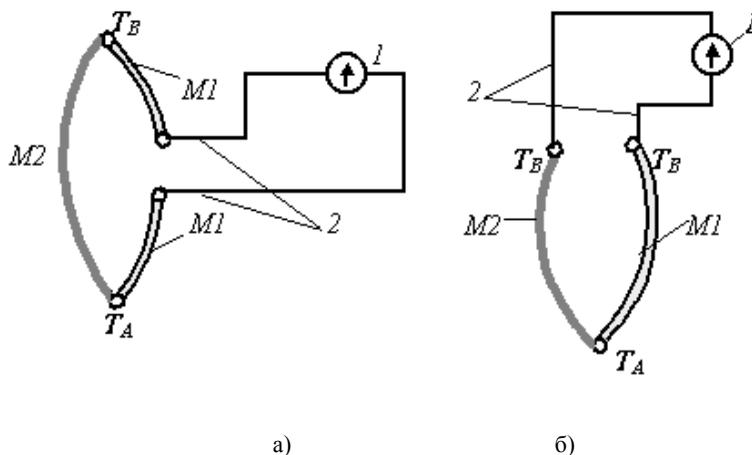


Рис. 4. Типичные схемы включения термопары

На рис.4а измерительный прибор 1 подключен с помощью соединительных проводов 2 в разрыв одного из термоэлектродов М1. Это типичная схема включения термопары с термостатированным контактом, когда температура одного из спаев поддерживается постоянной (обычно при температуре тающего льда 273К).

На рис.4б измерительный прибор подключен к концам термоэлектродов М1 и М2; T_A и T_B – температуры соответственно "горячего" и "холодного" контактов термопары. Это типичная схема включения термопары с нетермостатированным "холостым" кон-

тактом, когда температура T_B равна температуре окружающей среды.

Термоэдс ε термопары в небольшом интервале температур пропорциональна разности температур спаев.

$$\varepsilon = \alpha_{12} \cdot (T_A - T_B) \quad (9)$$

где α_{AB} - коэффициент термоэдса (*величина термоэдса, возникающая при разности температур спаев в 1К*).

$$\alpha_{12} = \frac{d\varepsilon}{dT} \quad \text{или} \quad \alpha_{12} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T}$$

Коэффициент термоэдса α_{12} зависит от коэффициентов термоэдса α_1 и α_2 веществ термоэлектродов:

$$\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2$$

Коэффициенты термоэдса различных веществ определяются по отношению к свинцу, для которого $\alpha_{Pb} = 0$. Коэффициент термоэдса может иметь как положительное, так и отрицательное значение и в общем случае зависит от температуры.

Для получения максимальной величины термоэдса необходимо выбирать материалы с наибольшими коэффициентами термоэдса противоположного знака.

При увеличении разности температур спаев термоэдс будет изменяться не по линейному закону, поэтому перед тем, как измерять температуру при помощи термопары, ее градуируют.

Диапазон температур, измеряемых при помощи термопар, очень велик: от температуры жидкого гелия до нескольких тысяч градусов. Чтобы увеличить точность измерений, используют схему включения термопары с термостатированным контактом (рис.4а).

Термоэдс весьма чувствительна к наличию химических примесей в спае. Для предохранения рабочего спая термопары от внешних химических воздействий он может быть помещен в защитную химическую оболочку.

Для увеличения термоэдса, термопары последовательно соединяют в термобатареи. Все четные спаи поддерживаются при одной температуре, а нечетные при другой. Термоэдс такой батареи равен сумме термоэдса ее отдельных элементов (рис. 5).

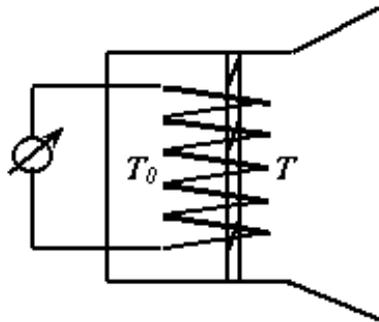


Рис. 5. Термобатарея

Миниатюрные термобатареи, составленные из тончайших полосок двух различных материалов, применяются для регистрации нагретых тел и измерения испускаемого ими электромагнитного излучения. В соединении с чувствительным гальванометром или электронным усилительным устройством они могут обнаружить, например, тепловое излучение человеческой руки на расстоянии в несколько метров. Высокая чувствительность термобатарей позволяет использовать их в качестве датчиков устройств сигнализации повышения температуры.

Термобатареи используются и как генераторы электрического тока. Они просты по устройству и не содержат механических движущихся частей. Однако использование металлических термоэлементов в качестве генераторов малоэффективно, поэтому для преобразования тепловой энергии в электрическую используются полупроводниковые материалы.

Поскольку эффект Пельтье связан с процессами выделения и поглощения тепла, он применяется в устройствах для охлаждения (холодильниках).

3. ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

Для градуировки используют заранее известные с высокой точностью значения температуры (например, температура таяния льда, кипения воды, плавления чистых металлов). При градуировке холодный спай термопары термостатируется в сосуде Дьюара с тающим льдом (т.е. поддерживается при температуре 0°C), а второй спай поочередно погружается в ванны с известной температурой. Результаты градуировки представляются в виде градуировочной таблицы или графика зависимости термоэдс от температуры.

ПРИЛОЖЕНИЕ

КВАНТОВОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕРМОЭДС

Возникновение термоэдс обусловлено тремя причинами:

1. температурной зависимостью уровня Ферми, что приводит к появлению контактной составляющей термоэдс;
2. диффузией носителей заряда от горячего конца к холодному, определяющей объемную часть термоэдс;
3. процессом увлечения электронов фононами, который дает еще одну составляющую – фононную.

Рассмотрим первую причину

Максимальная кинетическая энергия электронов проводимости в металле при 0К называется энергией Ферми. Уровень Ферми при абсолютном нуле и концентрация электронов проводимости связаны между собой соотношением:

$$E_f(0) = \frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} (3\pi^2 n)^{2/3} \quad (\text{П1}),$$

где \hbar – постоянная Планка, m – масса электрона, n – концентрация электронов проводимости.

У разнородных металлов концентрация электронов проводимости неодинаковые, поэтому будут различны и уровни Ферми E_{F1} и E_{F2} . Пусть концентрация n_2 в металле M_2 больше концентрации n_1 в металле M_1 . Рассмотрим энергетические диаграммы двух проводников M_1 и M_2 , расположенных на небольшом расстоянии друг от друга (рис. П1а). Пусть W_0 – энергия покоящегося свободного электрона в вакууме, где его потенциальная энергия равна нулю. Тогда, относительно этого уровня потенциальная энергия электрона проводимости в металле определяется его внутренней потенциальной энергией $e\phi$ и эффективной работой выхода A , а кинетическая энергия зависит от температуры и уровня Ферми. Полную энергию электрона в металле обозначим $E_F + e\phi$

Если металлы M_1 и M_2 привести в контакт (рис. П1 б, в), начнется диффузия электронов, в процессе которой электроны будут переходить из металла 2 в металл 1, так как $n_1 < n_2$ и следовательно $E_{F1} < E_{F2}$.

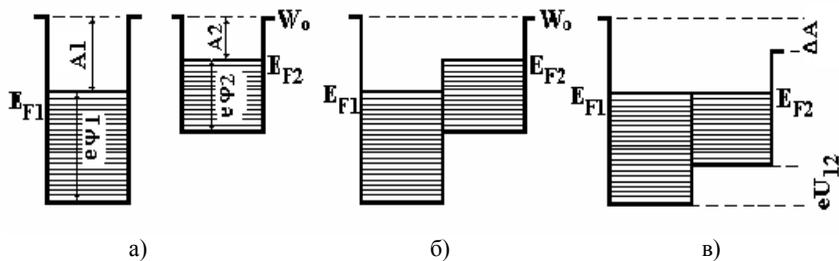


Рис. П1. Энергетическая диаграмма двух металлов:
 а) контакта нет; б) в контакте, но нет равновесия; в) равновесие

Действительно, в металле М2 имеются заполненные энергетические уровни, расположенные выше уровня Ферми E_{F1} первого металла. Электроны с этих уровней будут переходить на нижележащие свободные уровни металла М1, которые расположены выше уровня E_{F1} . В результате диффузии металл 2 будет заряжаться положительно, а металл 1 отрицательно, причем уровень Ферми у первого металла поднимается, а у второго опускается. Таким образом, в области контакта возникает электрическое поле, а, следовательно, и *внутренняя контактная разность потенциалов*, которая препятствует дальнейшему перемещению электронов. При некотором значении внутренней контактной разности потенциалов U_{12} между металлами установится равновесие, и уровни Ферми при этом сравняются. Это произойдет при равенстве энергий

$$E_{F1} + e\varphi_1 = E_{F2} + e\varphi_2$$

Отсюда следует выражение для внутренней контактной разности потенциалов

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U_{12} = \frac{E_{F1} - E_{F2}}{e} \quad (\text{П2})$$

Если оба спая А и В проводников находятся при одной и той же температуре, то контактные разности потенциалов равны и имеют противоположные знаки, то есть компенсируют друг друга.

При выводе предполагалось, что металлы находятся при низких температурах. Однако результат останется верным и при других температурах: нужно лишь иметь ввиду, что при $T \neq 0\text{K}$ уровень

Ферми зависит не только от концентрации электронов, но и от температуры.

При условии, что $kT \ll E_F$ эта зависимость имеет следующий вид:

$$E_F \approx E_F(0) \left[1 - \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{kT}{E_F(0)} \right)^2 \right]. \quad (П3)$$

Следовательно, если в местах спаев А и В поддерживать разную температуру, то сумма скачков потенциала в спаях будет отлична от нуля и вызовет появление ЭДС. Эта ЭДС, обусловленная контактными разностями потенциалов, согласно выражению П2 равна:

$$\begin{aligned} \varepsilon_k &= U_{12}(T_A) + U_{12}(T_B) = \frac{1}{e} \{ [E_{F1}(T_A) - E_{F2}(T_A)] + [E_{F1}(T_B) - E_{F2}(T_B)] \} = \\ &= \frac{1}{e} \{ [E_{F2}(T_B) - E_{F2}(T_A)] + [E_{F1}(T_B) - E_{F1}(T_A)] \} \end{aligned}$$

Последнее выражение можно представить следующим образом:

$$\varepsilon_k = \int_{T_A}^{T_B} \frac{1}{e} \frac{dE_{F2}}{dT} dT - \int_{T_A}^{T_B} \frac{1}{e} \frac{dE_{F1}}{dT} dT. \quad (П4)$$

Вторая причина обуславливает объемную составляющую термоэдс, связанную с неоднородным распределением температуры в проводнике. Если градиент температуры поддерживается постоянным, то через проводник будет идти постоянный поток тепла. В металле перенос тепла осуществляется в основном движением электронов проводимости. Возникает диффузионный поток электронов, направленный против градиента температуры. В результате, концентрация электронов на горячем конце уменьшится, а на холодном увеличится. Внутри проводника возникает электрическое поле \vec{E}_T , направленное против градиента температуры, которое препятствует дальнейшему разделению зарядов (рис. П2)

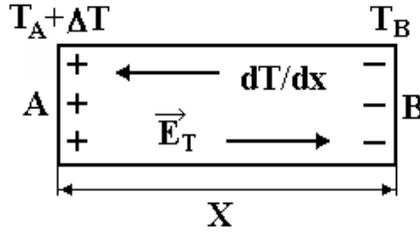


Рис. П2. Возникновение термоЭДС в однородном материале вследствие пространственной неоднородности температуры.

Таким образом, в равновесном состоянии наличие градиента температуры вдоль образца создает постоянную разность потенциалов на его концах. Это и есть диффузионная (или объемная) составляющая термоэдс, которая определяется температурной зависимостью концентрации носителей заряда и их подвижностью. Электрическое поле возникает в этом случае в объеме металла, а не на самих контактах.

Третий источник термоэдс – эффект увлечения электронов фононами. При наличии градиента температуры вдоль проводника возникает дрейф фононов (квантов энергии упругих колебаний решетки), направленный от горячего конца к холодному. Сталкиваясь с электронами, фононы сообщают им направленное движение, увлекая их за собой. В результате, вблизи холодного конца образца будет накапливаться отрицательный заряд (а на горячем положительный) до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не уравнивает эффект увлечения. Эта разность потенциалов и представляет собой дополнительную составляющую термоэдс, вклад которой при низких температурах становится определяющим.

$$\varepsilon_{1AB} = \int_A^B d\varphi = \int_A^B \frac{d\varphi}{dT} dT = \int_{T_A}^{T_B} \beta_1 dT, \quad (\text{П5})$$

где $\beta_1 = \frac{d\varphi}{dT}$ – коэффициент объемной термо-ЭДС в металле М1.

$$\varepsilon_{2AB} = -\int_A^B d\varphi = -\int_A^B \frac{d\varphi}{dT} dT = -\int_{T_A}^{T_B} \beta_2 dT, \quad (\text{П6})$$

где $\beta_2 = \frac{d\varphi}{dT}$ – коэффициент объемной термо-ЭДС в металле М2.

Сумма всех этих ЭДС образует термоэлектродвижущую силу

$$\varepsilon_T = \varepsilon_k + \varepsilon_{A21} + \varepsilon_{B12}. \quad (\text{П7})$$

Подставив выражения (П4), (П5) и (П6) в равенство (П7), получим

$$\varepsilon_T = \int_{T_A}^{T_B} \left(\beta_1 - \frac{1}{e} \frac{dE_{F1}}{dT} \right) dT - \int_{T_A}^{T_B} \left(\beta_2 - \frac{1}{e} \frac{dE_{F2}}{dT} \right) dT \quad (\text{П8})$$

Величина $\alpha = \beta - \frac{1}{e} \frac{dE_F}{dT}$ называется коэффициентом термо-

ЭДС и является функцией температуры.

Абсолютные значения всех термоэлектрических коэффициентов растут с уменьшением концентрации носителей. В металлах концентрации свободных электронов очень велики и не зависят от температуры; электронный газ находится в вырожденном состоянии и поэтому уровень Ферми, энергия и скорости электронов также слабо зависят от температуры. Поэтому коэффициенты термоэдс «классических» металлов очень малы (порядка нескольких мкВ/К). Для полупроводников α может превышать 1000 мкВ/К.

Используя коэффициент α , представим выражение (П8) в виде:

$$\varepsilon_T = \int_{T_A}^{T_B} \alpha_1 dT - \int_{T_A}^{T_B} \alpha_2 dT \quad \text{или} \quad \varepsilon_T = \int_{T_A}^{T_B} \alpha_{12} dT \quad (\text{П9}),$$

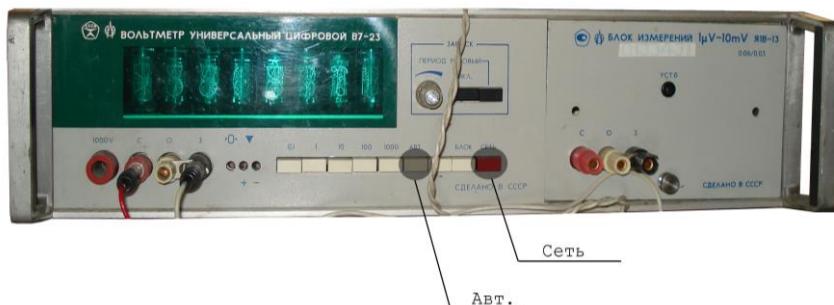
где $\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2$ – называется дифференциальной или удельной термоэлектродвижущей силой данной пары металлов.

Если α_{12} слабо зависит от температуры, тогда формулу (П9) можно приближенно представить в виде:

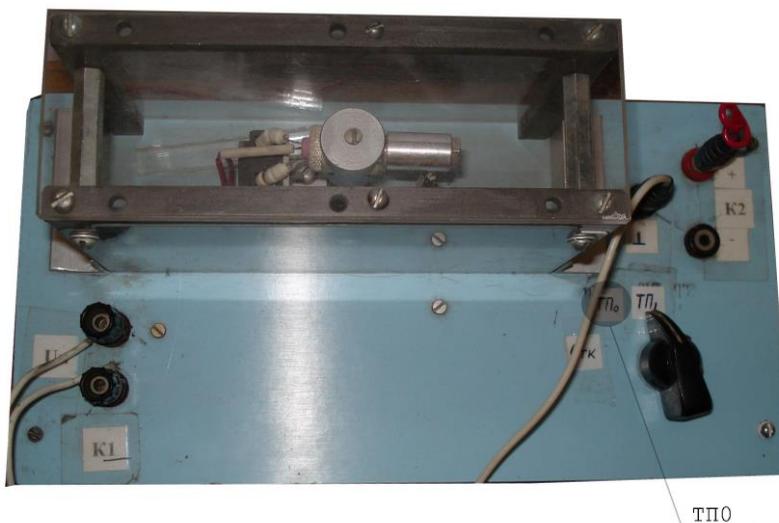
$$\varepsilon = \alpha_{12} (T_B - T_A). \quad (\text{П10})$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

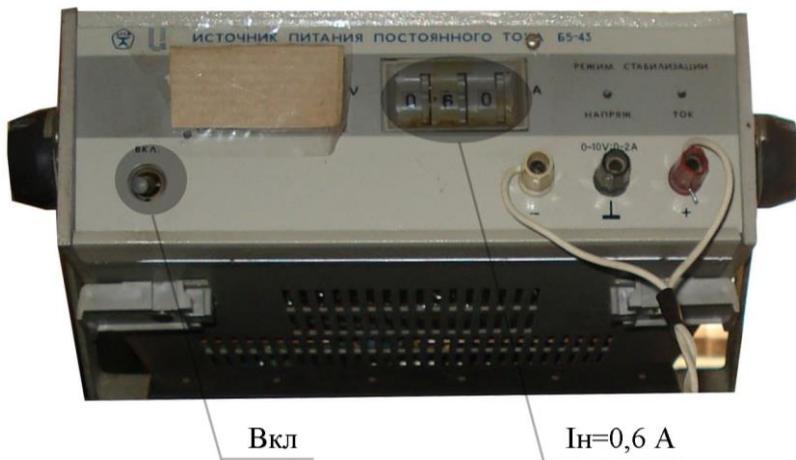
1. Подготовить к работе цифровой универсальный вольтметр В7-23, для этого нажать на передней панели прибора на кнопку «сеть», а затем на кнопку «авт.» автоматической установки предела измерений.



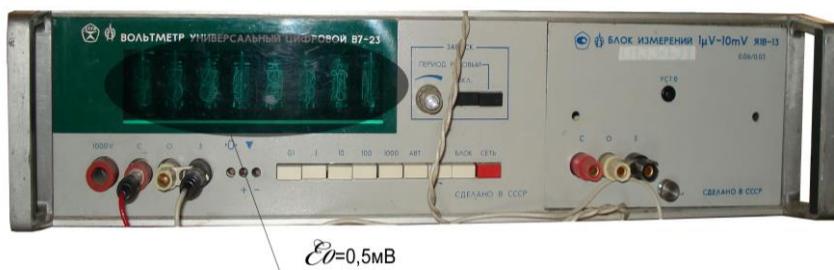
2. Подключить к цифровому вольтметру В7-23 образцовую термопару. Для этого переключатель «П» блока термопар перевести в положение «ТП₀».



3. Установить на источнике нагревателя термопар ток нагрузки $I_n = 0,6 \text{ А}$. Чтобы включить нагрев рабочих спаев образцовой и исследуемой термопар, сетевой тумблер источника питания нагревателя установить в положение «вкл.»



4. При достижении температуры нагревателя термопар, при которой ЭДС образцовой термопары достигнет значения $\varepsilon_0 = 0,5 \text{ мВ}$, необходимо ко входу цифрового вольтметра В7-23 вместо образцовой термопары подключить исследуемую термопару. Для этого переключатель «П» блока термопар следует быстро перевести в положение «ТП_н» и занести в таблицу результатов измерений, полученное значение ЭДС исследуемой термопары ε_n .

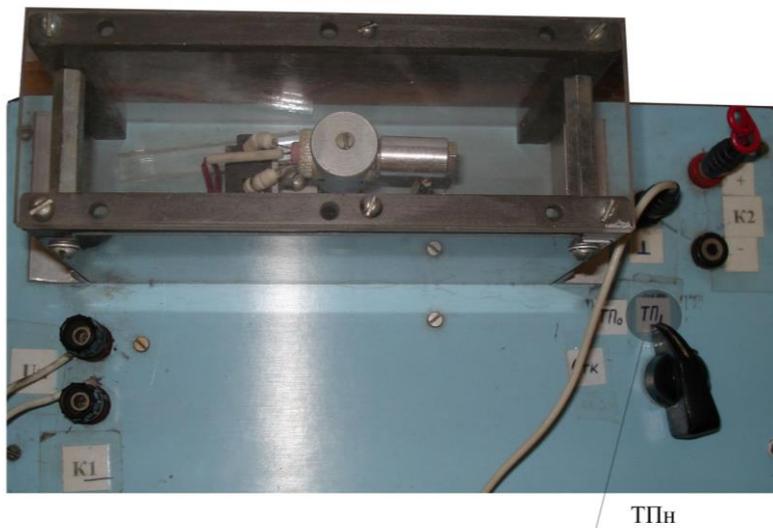
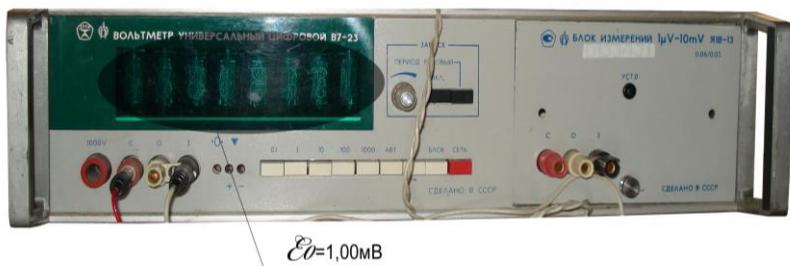




5.

Таблица 1

№ п/п	Ток нагре- вателя I_n, A	$\epsilon_0,$ мВ	$\epsilon_n,$ мВ	$\Delta t,$ $^{\circ}C$	$t_{cp},$ $^{\circ}C$	$t_n = \Delta t + t_{cp},$ $^{\circ}C$
1	0,00	0,00				
2	0,60	0,50				
3	0,70	1,00				
4	0,80	1,50				
5	0,90	2,00				
6	0,90	2,50				
7	1,00	3,00				
8	1,00	3,50				
9	1,10	4,00				
10	1,10	4,50				
11	1,20	5,00				
12	1,20	5,50				
13	1,20	6,00				
14	1,20	6,50				
15	1,20	7,00				



Полученное значение ЭДС исследуемой термопары \mathcal{E}_n занести так же в таблицу 1 результатов измерений.

8. Увеличить ток нагревателя на 0,1А и при значении ЭДС образцовой термопары $\mathcal{E}_0 = 1,50mV$ переключатель «П» перевести в положение, соответствующее измерению ЭДС исследуемой термопары \mathcal{E}_n занести в таблицу 1 результатов измерений.



$I_H = 0,9 \text{ A}$



$\mathcal{E}_0 = 1,50 \text{ мВ}$

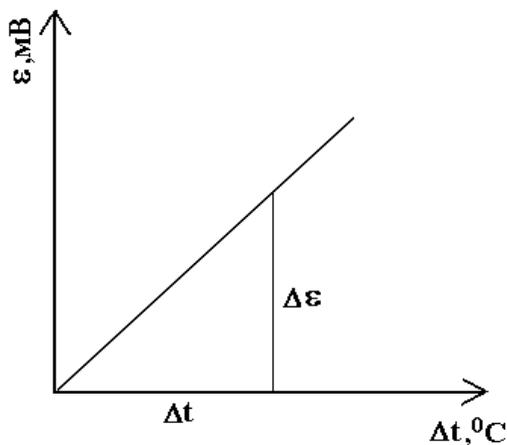
9. Аналогичным способом, увеличивая ток нагревателя согласно рекомендациям таблицы 1, измерить ЭДС исследуемой термопары при значениях ЭДС образцовой термопары **2,00мВ; 2,50мВ; 3,00мВ; 3,50мВ; 4,00мВ; 4,50мВ; 5,00мВ; 5,50мВ; 6,00мВ; 6,50мВ; 7,00мВ.**

10. По результатам выполнения измерений ЭДС образцовой термопары (см. табл.1), используя градуировочную таблицу значений ЭДС образцовой термопары, определить разность температур нагретого и холодного концов термопар Δt и записать в таблицу 1.

11. Определить действительные значения температур нагревателя, как $t_n = \Delta t + t_{cp}$ и записать полученные значения температуры нагревателя в таблицу 1. Здесь t_{cp} – температура среды.

12. Используя данные градуировочной таблицы и таблицы 1 построить на миллиметровой бумаге график зависимости ЭДС образцовой и исследуемой термопары от разности температур концов.

13. Используя графики зависимости ЭДС образцовой и исследуемой термопар от разности температур концов по углу наклона полученных прямых, определить значения коэффициентов термоЭДС α_{o12} образцовой и $\alpha_{н12}$ исследуемой термопар по формуле: $\alpha_{12} = \Delta \varepsilon / \Delta t$



14. Коэффициент термоЭДС α_{12} - величина, зависящая от коэффициентов термоЭДС веществ α_1 и α_2 , из которых изготовлены термопары, и равна их разности $\alpha_{12} = \alpha_1 - \alpha_2$.

15. Используя данные таблицы 2 для коэффициентов α_1 и α_2 термоЭДС материалов, из которых изготовлена используемая в данной лабораторной работе в качестве образцовой хромель-копелевая термопара, рассчитать значение коэффициента термоЭДС α_{o12} этой термопары. Сравнить полученное значение коэффи-

циента термоЭДС α_{o12} со значением коэффициента термоЭДС α_{o12} , полученным при выполнении п.13 задания.

16. Используя данные таблицы 2 определить материал, из которого изготовлен термоэлектрод А исследуемой термопары, если известно, что термоэлектрод В исследуемой термопары изготовлен из алюминия, для которого $\alpha_2 = -17,3\text{мкВ/град}$

Таблица 2. Коэффициенты термоЭДС некоторых материалов относительно свинца

	Материал	Коэффициент термоЭДС, мкВ/град
Металлы	Sb (сурьма)	43
	Fe (железо)	15
	W (вольфрам)	3,6
	Cu (медь)	3,2
	Au (золото)	2,9
	Ag (серебро)	2,7
	Pb (свинец)	0
	Pt (платина)	-4,4
	Ni (никель)	-20,8
Сплавы	Висмут	-68
	Хромель	24
	Копель	-38
	Алюмель	-17,3
	Нихром	-18
Полупроводники	Константан	-38
	MoS (сульфид молибдена)	-770
	CuO (окись меди)	-700
	CdO (окись кадмия)	-40
	FeS (сульфид железа)	26
	NiO (окись никеля)	240
	Cu ₂ O (закись меди)	1200,00

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И.В. Курс общей физики: в 3 т. / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1978. – Т. 2.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2003.
3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: в 6 т. / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1976. – Т. 3.