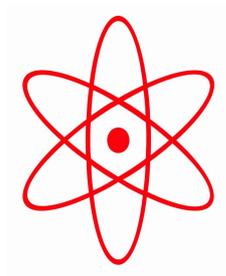


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ



ФЭЛ-17

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО. ЭФФЕКТ ЗЕЕБЕКА.

Тула, 2008 г

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО. ЭФФЕКТ ЗЕЕБЕКА.

Цель работы: практическое изучение термоэлектрических явлений, исследование влияния разности температур на величину термоэлектродвижущей силы, определение постоянной термопары.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Введение.

Если привести два разных металла в соприкосновение, между ними возникнет разность потенциалов, которая называется контактной. Контактная разность потенциалов вызывается тем, что при соприкосновении металлов часть электронов переходит из одного металла в другой. Граница металла является потенциальным барьером, ограничивающим выход электрона во внешнее пространство. Чтобы вырвать свободный электрон из металла, надо совершить определенную работу. Эта величина называется работой выхода и зависит от природы металла. Из-за различия в величине работы выхода и диффузный поток электронов через границу металлов не будет уравновешенным, и металл с меньшей работой выхода зарядится положительно.

Подобным образом и различие концентрации свободных электронов в контактирующих металлах приведет к появлению скачка потенциала в месте контакта. В разных металлах плотность электронного газа различна. Поэтому различно и количество электронов, пересекающих в единицу времени место контакта в прямом и обратном направлениях. В результате металл, имеющий большую плотность электронного газа, будет терять электронов больше, чем получать, т. е. он будет заряжаться положительно. Металл, имеющий меньшую плотность электронного газа, будет заряжаться отрицательно. Возникшие заряды создают поле, которое будет тормозить дальнейший переход из одного металла в другой. В какой-то момент переход электронов прекратится, а в месте контакта установится некоторая разность потенциалов, называемая внутренней контактной разностью потенциалов.

Явление термоэлектричества. Эффект Зеебека.

Эффект Зеебека - возникновение ЭДС (термоЭДС) в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников M_1 и M_2 , если места контактов (А, В) поддерживаются при разных температурах.

Если цепь замкнута, то в ней течет электрический ток (так называемый термоток I_T), причем изменение знака у разности температур спаев сопровождается изменением направления термотока (рис. 1).

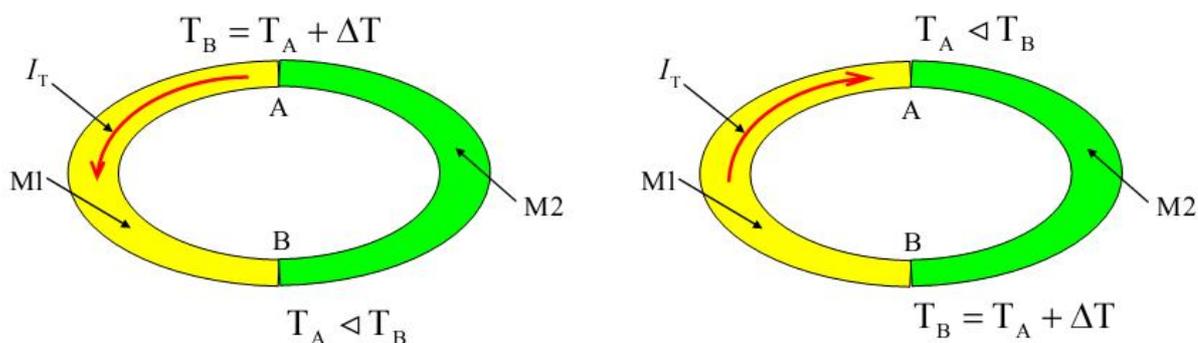


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая возникновение ТермоЭДС в электрической цепи из последовательно соединенных разнородных проводников.

Цепь, составленная из двух различных проводников (M_1 , M_2 называется термоэлементом или термопарой, а ее ветви - термоэлектродами.

Величина термоЭДС зависит от абсолютных значений температур спаев (T_A , T_B), разности этих температур ΔT и от природы материалов, составляющих термоэлемент.

Как было сказано выше, одной из причин возникновения термоЭДС является наличие разности в плотностях электронного газа для различных металлов. Рассмотрим более подробно эту причину.

Исходя из классической модели электронного газа, оценим величину контактной разности двух проводящих материалов с различной концентрацией электронов.

Возникновение внутренней контактной разности потенциалов связано с различием концентраций свободных электронов в металлах. Допустим, $n_1 > n_2$ (см. рис. 2). Будем рассматривать процессы, основываясь на представлениях классической электронной теории. При одинаковой температуре металлов (T) давление электронного газа в первом металле будет $P_1 = n_1 kT$, во втором $P_2 = n_2 kT$. В результате неравновешенного диффузионного перехода электронов возникает внутренняя разность потенциалов, появляется электрическое поле, которое вызывает прекращение преимущественного перехода и установление динамического равновесия.

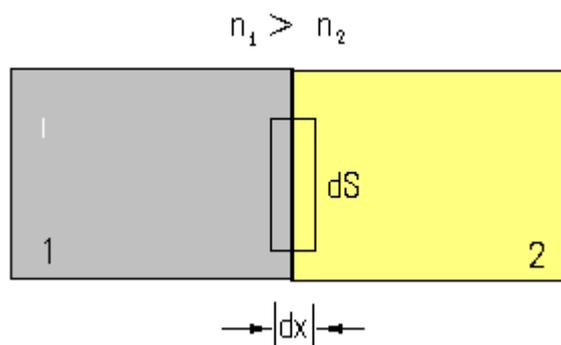


Рис. 2. К оценке величины контактной разности потенциалов

Рассмотрим тонкий слой dx вблизи границы раздела металлов. Перепад давлений на участке dx будет $dp = kTdn$. Выделим в рассматриваемом слое некоторый объем $dx dS$. Тогда сила $dF_{мех}$, действующая на электронный газ в этом объеме вследствие разности давлений будет равна:

$$dF_{мех} = dpdS = kT dn dS. \quad (1.1)$$

Но электроны имеют электрический заряд и в возникшем внутреннем поле на них будет действовать $dF_{эл}$, равная и противоположно направленная $dF_{мех}$:

$$dF_{эл} = eEndxdS, \quad (1.2)$$

где $ndxdS$ - число электронов в рассматриваемом объеме, eE - сила, действующая на каждый электрон, $E = \frac{d\phi}{dx}$. При достижении динамического равновесия $dF_{мех} = dF_{эл}$:

$$kT dn dS = e \frac{d\phi}{dx} ndxdS \quad (1.3)$$

Сокращая в (1.3) на элемент площади dS , а в правой части ещё и на dx , получим дифференциальное уравнение:

$$kT dn = end\phi \quad (1.4)$$

Разделив переменные, получаем дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{dn}{n} = \frac{e}{kT} d\phi. \quad (1.5)$$

Интегрируя (1.5) в пределах всего слоя контакта, получим величину контактной разности потенциалов

$$\phi = \frac{kT}{e} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{n} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (1.6)$$

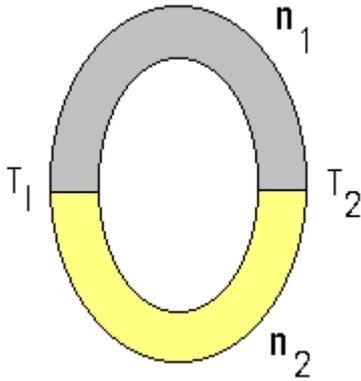


Рис. 3. Пояснение к формулам (1.7), (1.8)

Если цепь, состоящую из разнородных проводников при одинаковой температуре, замкнуть, то в каждом из контактов возникнет разность потенциалов, но электрический ток в цепи не возникает, так как результирующая контактная разность потенциалов $\Delta\phi$ равна:

$$\Delta\phi = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right) + \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_1}{n_2} \right) = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right) - \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = 0 \quad (1.7)$$

Однако, если контакты замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, поддерживать при различных температурах, то в цепи возникает электрический ток, направление которого изменяется при изменении знака разности температур. Результирующая контактная разность потенциалов в этом случае записывается аналогично (1.7):

$$\Delta\varphi = \frac{kT_1}{e} \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) - \frac{kT_2}{e} \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \frac{k(T_1 - T_2)}{e} \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.8)$$

Сумма контактных скачков потенциала равна термоэлектродвижущей силе $\Delta\varphi = \varepsilon$.

Обозначая $\frac{k}{e} \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \alpha$, получим следующее выражение для величины

термоэлектродвижущей силы:

$$\varepsilon = \alpha(T_1 - T_2) \quad (1.9)$$

Величину α называют удельной термоЭДС, коэффициентом термоэдс или коэффициентом Зеебека ($\alpha = 10^{-4} - 10^{-5}$ Вольт/К). Хотя ТЭДС прямо пропорциональна разности температур спаев, она зависит не только от нее. Особенно это заметно при большой разности температур. Поэтому для характеристики термоэлектрических свойств какой-либо пары проводников пользуются удельной термоЭДС, которая равна термоэлектродвижущей силе, возникающей при разности температур спаев в один градус:

$$\alpha = \frac{d\varepsilon}{dT} \quad (1.10)$$

Для металлов величина α порядка десятков мкВ·К⁻¹ и, как правило, слабо зависит от температуры. У полупроводников она на один-два порядка больше и сильно зависит от температуры. Поэтому в ограниченном интервале температур для металлов можно считать, что термоЭДС ε изменяется линейно в зависимости от разности температур $\Delta T = (T_1 - T_2)$, а $\alpha \approx \text{const}$.

Практическое применение эффекта Зеебека. Устройство термопары.

Замкнутая цепь, состоящая из двух разнородных металлов, места соединения которых поддерживаются при различных температурах, называется термопарой (рис. 4). Технически термопара представляет собой две проволоки из различных металлов, в месте контактов которые свариваются или спаиваются. Один из контактов помещается в термостатированную среду большой теплоемкости с известной и постоянной температурой T_0 , а второй в область, температура которой измеряется T .

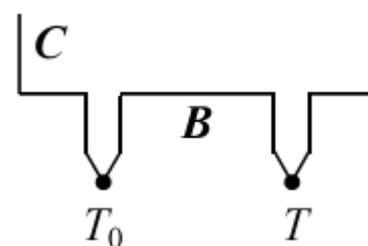


Рис. 4. Схема включения дифференциальной термопары

Для измерения возникающей термоэдс в цепь необходимо включить гальванометр. Для подключения этого прибора разрыв цепи производится по проводнику, приобретающему положительный потенциал в контакте с другим. Так, в термопаре медь–константан разрыв осуществляется по меди.

Зависимость термоэдс от температуры для данной пары металлов, составляющей термопару, обычно заранее известна (в виде градуировочного графика $\varepsilon = \alpha(T_1 - T_2)$ где α – угол наклона этого графика к оси температур). Такая термопара называется дифференциальной, т.к. с ее помощью можно измерять разность температур.

Оценить температуру какой-то среды можно и с помощью термопары, схема измерения которой представлена на рис. 5. В этом случае показания термопары в значительной степени будут зависеть от колебаний температуры окружающей среды T_0 (роль второго спая играет контакт с гальванометром).

Погрешность определения температуры с помощью термопар определяется в основном неоднородностью термопарной проволоки и составляет как правило, несколько градусов, и лишь у некоторых особо однородных сплавов достигает 0.1 К. ЭДС термопары генерируется на тех участках проволоки, где есть градиент температуры. Если градиент температуры в разных измерениях будет падать на разных участках проволоки, отличающихся по своим свойствам, то и термоЭДС будет немного отличаться. Проволоки большего диаметра, как правило, более однородны. Проволоки из чистых металлов, как правило, демонстрируют большую однородность, чем из сплавов.

При высоких температурах зависимость ЭДС термопары ε от температуры T близка к линейной, соответственно чувствительность $d\varepsilon/dT$ слабо зависит от температуры. При низких температурах чувствительность большинства термопар (за исключением специальных низкотемпературных) падает при приближении к абсолютному нулю температуры. Например у медь–константановой термопары при комнатной температуре чувствительность порядка 40 мкВ/К, а при температуре жидкого азота ($T=77\text{К}$) чувствительность уже 10 мкВ/К.

Следует отметить, что полуметаллы (висмут, сурьма) и особенно полупроводниковые материалы позволяют получить значительно более высокую чувствительность, чем металлы – до 1000 мкВ/К, но они не годятся для термометрии вследствие плохой воспроизводимости (свойства полупроводников определяются небольшим количеством легирующих примесей и поэтому воспроизводимость их свойств всегда хуже, чем у металлов и металлических сплавов) и невозможности изготовить из них

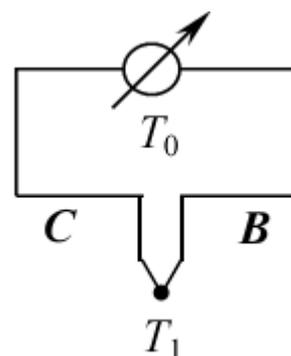


Рис. 5.Схема включения термопары.

гибкую проволоку. Полупроводниковые элементы применяются в прямом преобразовании энергии из тепловой формы в электрическую и наоборот.

Термопара платина – сплав (платина+10% родий) имеет стандартную градуировку от 0 °С до 1600 °С, а в области температур 630°С – 1064°С является *эталонным интерполяционным прибором* для установления практической температурной шкалы по реперным точкам затвердевания сурьмы, серебра и золота. Однако она содержит драгметалл, что несколько мешает ее широкому использованию.

Для точной работы необходима индивидуальная градуировка того сорта проволоки, из которой изготовлена термопара, причем градуировку часто представляют в виде поправок к стандартной таблице. Константан из различных партий может иметь существенно отличающиеся (до 5%) термометрические характеристики, что не позволяет создать стандартные таблицы для константановых термопар.

Конструктивное исполнение термопар различно для работы в области низких и высоких температур. Использование термопар при высоких температурах ограничивается термостойкостью (плавлением и окислением) самих проводов термопары. Обычно диаметр проволок термопары составляет 0.2–0.5 мм (более толстая проволока, как правило, более однородна). Высокотемпературные термопары изготавливают сваркой голых проволок, электроизоляция выполняется керамической соломкой (есть специальная двухканальная), иногда термопара заключается в металлический чехол с герметизацией на холодном конце. В низкотемпературных (ниже 100°С) термопарах можно применять простые электроизолированные провода ПЭЛ или ПЭЛШО, а измерительный спай можно спаять обычным припоем.

Достоинствами термопары являются:

- простота изготовления
- воспроизводимость
- малая теплоемкость и поэтому малая инерционность показаний;
- удобство измерения именно разности температур
- нулевая рассеиваемая мощность на термопаре
- простота регистрирующей аппаратуры – не нужен источник питания
- малое выходное сопротивление

Неудобствами являются:

- необходимость термостатирования опорного спаивания
- часто недостаточная чувствительность ($d\varepsilon/dT$), особенно в области низких температур
- относительно большой теплоподвод к измеряемому объекту теплопроводностью по проволокам термопары
- проблема вывода электродов из герметичного объема

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

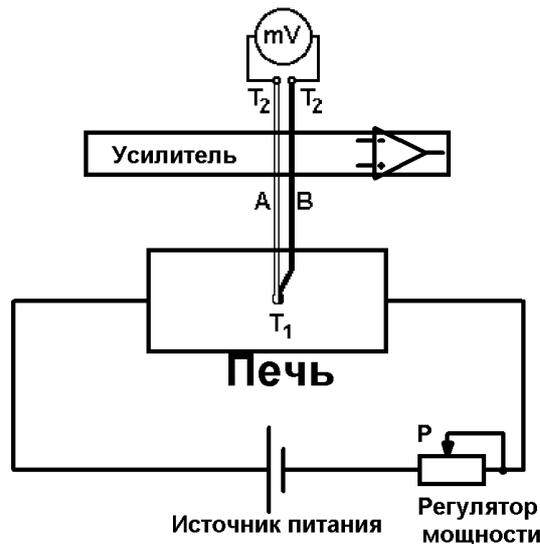


Рис. 6. Принципиальная упрощенная электрическая блок-схема учебной установки ФЭЛ-17 для наблюдения термоэлектрического эффекта.

Принципиальная схема для изучения эффекта Зеебека приведена на рис. 6. Конструктивно установка состоит из узкой и длинной электропечи (для равномерного нагрева) с регулируемой мощностью нагрева, в которую помещаются концы термопары А и В. Другие концы подключены через специальный усилитель к высокоточному цифровому вольтметру mV и находятся при температуре окружающей среды T_2 . ТермоЭДС ввиду малой величины (порядка нескольких милливольт) не может быть зарегистрирована непосредственно вольтметром, поэтому сигнал с термопары усиливается операционным усилителем. Для уменьшения погрешности применяется специально сконструированный цифровой вольтметр с высоким (около 100 МОм) входным сопротивлением, поэтому с достаточной степенью точности можно считать, что термоЭДС ε равна напряжению на клеммах вольтметра mV . Температура T_1 горячего спая измеряется высокоточным цифровым термодатчиком, также введенным в полость электропечи. Точность измерения температуры термодатчика составляет ± 1 °С. Все измеренные и контролируемые параметры (мощность нагрева P , температура T_1 а также термоЭДС выводятся на LCD ЖКД дисплей). Температура T_2 окружающей среды измеряется либо комнатным термометром, либо принимается равной показанию цифрового датчика температуры T до начала нагрева.

Вследствие технических особенностей применяемого в учебной установке усилителя, даже при равенстве температур окружающей среды T_2 и температуры спая T_1 ($T_1 = T_2$) возможно индицирование на измерительном приборе некоторого значения ЭДС ε_0 . Поэтому за начало отсчета термоЭДС следует принять это значение ε_0 , т. е. истинное значение $\varepsilon_{\text{ист}}$ термоэдс будет определяться по формуле:

$$\varepsilon_{\text{ист}} = \varepsilon_{\text{mV}} - \varepsilon_0 \quad (2.1)$$

где ε_{mV} — показания милливольтметра, ε_0 — установленный вами начальный уровень отсчета. Еще раз подчеркнем, что это обстоятельство связано исключительно с техническими особенностями эксплуатации усилителя, применяемого в данной работе.

Скорость нагрева регулируется с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ». Удержание кнопок приводит к плавному возрастанию мощности печи. Для охлаждения предусмотрена возможность включения кулера нажатием кнопки «ОХЛАЖДЕНИЕ». Отключение кулера осуществляется нажатием той же кнопки. При перегревании электропечи свыше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ срабатывает автоматическое включение охлаждения, а электропечь отключается.

Порядок выполнения.

1. Перед началом работы ознакомится с принципиальной схемой учебной установки рис. 6, разобраться в назначении кнопок и измерительного прибора. Проверить целостность сетевого провода
2. Включить установку в сеть ~ 220 В. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор.
3. Дать установке прогреться в течение трех минут.
4. Измерить значение ε_0 — начало отсчета термоЭДС по начальным показаниям милливольтметра.
5. Измерить значение комнатной температуры T_2 с помощью комнатного термометра либо принять это значение показанию цифрового термодатчика.
6. Подготовить таблицу 1 для записи результатов измерения зависимости термоЭДС от температуры. Во время нагрева в таблицу следует записывать показания вольтметра ε_{mV} и температуру горячего спая T_1 , $^{\circ}\text{C}$, остальные расчеты проводить после включения охлаждения.

таблица 1

	$\varepsilon_0 = \dots \text{ мВ}, T_2 = \dots \text{ }^{\circ}\text{C}$ – окруж. среда			
$\varepsilon_{mV}, \text{ мВ}$				
$\varepsilon_{\text{ист}} = \varepsilon_{mV} - \varepsilon_0, \text{ мВ}$				
$T_1, \text{ }^{\circ}\text{C}$				
$\Delta T = (T_1 - T_2), \text{ }^{\circ}\text{C}$				

$$\alpha = \frac{d\varepsilon_{\text{ист.}}}{dT} = \dots \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$$

7. Установив мощность электропечи равную 30 % с помощью кнопок «МОЩНОСТЬ НАГРЕВАТЕЛЯ», приступить к снятию зависимости термоэдс ε_{mV} от температуры горячего спая T_1 , записывая через один-два градуса значение показаний вольтметра и температуры.
8. При достижении температуры $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ мощность нагрева рекомендуется повысить до 60-70 %.
9. Нагрев производить до температуры 70-75 $^{\circ}\text{C}$, после чего включить систему охлаждения нажатием кнопки «ОХЛАЖДЕНИЕ». Охлаждать нагреватель следует в течение получаса до достижения практически комнатной температуры $\approx 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$
10. Заполнить таблицу 1, рассчитав истинное значение термоЭДС с поправкой на начальный уровень по формуле (2.1) и разность температур $\Delta T = (T_1 - T_2)$ для каждого значения T_1 .
11. Построить график зависимость термоЭДС от разности температуры $\varepsilon_{\text{ист}}(\Delta T)$. Выбрав линейный участок на графике, определить значение

удельной термоЭДС $\alpha = \frac{d\varepsilon_{уст.}}{dT} \approx \frac{\Delta\varepsilon_{уст.}}{\Delta T} = \operatorname{tg}\gamma$ как тангенс наклона линейного участка графика к оси абсцисс (оси ΔT). В качестве $\Delta\varepsilon$ и ΔT для повышения точности рекомендуется брать максимально возможные приращения. Рекомендуется также воспользоваться методом наименьших квадратов (см. приложение).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните механизм возникновения контактной разности потенциалов.
2. От чего зависит величина внутренней контактной разности потенциалов?
3. Выведите формулу для величины контактной разности потенциалов, основываясь на представлениях классической электронной теории.
4. При каком условии появляется термоЭДС в цепи, состоящей из разнородных материалов? Что такое удельная термоЭДС?
5. Обоснуйте точность метода измерения ЭДС источника с помощью вольтметра.
6. Объясните применение термопар для измерения температуры. Приведите схемы включения термопар.
7. Объясните принцип работы экспериментальной учебной установки согласно схеме рис. 6.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Совместные измерения. Понятие о методе наименьших квадратов (МНК)
Рассмотрим случай совместных измерений двух величин β и α . Если уравнения измерения, связывающие эти величины, линейны, то для определения β и α в результате многократных измерений некоторых других величин x_i и y_i получится линейная система условных уравнений, каждое из которых имеет вид

$$y_i = \beta x_i + \alpha \quad (1)$$

где x_i, y_i - результаты i -го измерения величин x и y ; β и α - искомые величины.

Система уравнений (1) будет, вообще говоря, несовместна, так как результаты измерений x и y неизбежно содержат погрешности. Поэтому из этих уравнений можно определить только оценки величин β и α (соответственно B и A), которые являются случайными величинами.

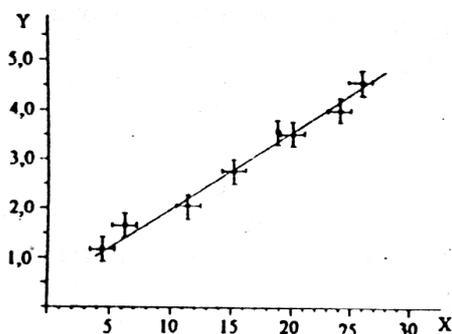


рис. 1

Для наглядности изложения представим все опытные данные x_i и y_i на графике (см. рис. 1). Геометрически задача измерения α и β состоит в определении параметров некоторой прямой: значения ординаты при нулевом значении абсциссы и тангенса угла наклона соответственно.

Так как между точками на графике можно провести не одну прямую, возникает задача - провести прямую наилучшим образом. Такая прямая характеризуется наиболее точными оцен-

ками коэффициентов β и α , т.е. наиболее вероятным.

Оценка β (значение B) определяется выражением

$$B = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

Оценка α (значение A) определяется выражением

$$A = \bar{y} - B\bar{x}$$

Можно показать, что оценка стандартного отклонения коэффициента B выражается следующим образом:

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Bx_i - A)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}$$

Интервал, в котором с установленной вероятностью α_0 может находиться коэффициент β , записывается в виде $\Delta B = t_{\alpha_0, (n-2)} \cdot S_B$

Тогда можно записать:

$$\beta = B \pm \Delta B$$

Стандартное отклонение коэффициента A определяется по формуле

$$S_A = \sqrt{\left(\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right) \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Bx_i - A)^2}{n-2}}$$

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Д.В.Сивухин. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М., Наука, 1979. (§§ 5-6 – Виды термометров. Практическая температурная шкала. – стр. 28-35.)
2. А.К.Кикоин, И.К.Кикоин. Молекулярная физика. — М., Наука, 1976. (§ 19 – Измерение параметров состояния – стр.83-94)
3. Руководство к лабораторным занятиям по физике. (ред. Л.Л.Гольдин) — М., Наука, 1973. (Работа 6 – Градуирование термопары – стр.65-71.)
4. Физический практикум. (ред. В.И.Иверонова) – М., Гос. издательство физико-математической литературы, 1962. (Задача 25 – Изготовление и градуировка термопар – стр.142-145.)
5. Практикум по общей физике, (ред. В.Ф.Ноздрев), М., Просвещение, 1971. (Работа 9 – Определение температуры кристаллизации сплава Вуда – стр. 128-131.)
6. М.М.Попов. Термометрия и калориметрия. М., Изд. МГУ, 1954. (глава 5)

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ,
НПО Учебной Техники «ТУЛАНАУЧПРИБОР», Россия, г. Тула**