

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОЭДС МЕТАЛЛОВ

КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ПРОВОДНИКОВ

История открытия термоэлектрических явлений насчитывает уже более 180 лет. Практическое использование они получили только в середине XX века, то есть спустя 130 лет после открытия и в первую очередь благодаря работам советского академика А.Ф. Иоффе. Начало же положил немецкий ученый, уроженец г. Ревеля (в настоящее время г. Таллин), Зеебек (Seebeck) Томас Иоганн (1770-1831). В 1822 году он опубликовал результаты своих опытов в статье «К вопросу о магнитной поляризации некоторых металлов и руд, возникающей в условиях разности температур», опубликованной в докладах Прусской академии наук. Зеебек обнаружил, что при замыкании концов цепи, состоящей из двух разнородных металлических материалов, спаи которых находились при разных температурах, магнитная стрелка, помещенная вблизи этой цепи, поворачивалась так же, как в присутствии магнита. Угол поворота стрелки был связан с величиной разности температур на спаях исследуемой цепи. В физике данное явление известно, как «эффект Зеебека». Однако, несмотря на то, что двумя годами ранее в 1820 году Эрстед (Ersted) Ханс Кристиан (1777-1851), доказал влияние электрического тока на магнитную стрелку, а вслед за этим работами Ампера, Био, Савара, Лапласа и других ученых было детально исследовано взаимодействие электрических токов и магнитных полей, Зеебек категорически отрицал электрическую природу данного явления. Как видно из названия статьи, его объяснение сводилось к намагничиванию материалов под воздействием разности температур. Интересно, что по его гипотезе весь земной шар представлял собой подобие гигантской цепи, в которой разница температур поддерживается полюсами холода и высокотемпературной экваториальной частью планеты. По крайней мере, именно в этом Зеебек усмотрел природу земного магнетизма.

Первым, кто употребил термин «термоэлектрическое явление» был Х. Эрстед, внимательно следивший за работами Зеебека. Однако, сам Зеебек настаивал на другой формулировке – «термомагнетизм». Зеебек накопил огромный экспериментальный материал по изучению цепей из комбинаций твердых, жидких металлов, сплавов и соединений при воздействии на них разных температур. Это позволило ему создать термоэлектрический ряд, который до сих пор представляет интерес и не сильно отличается от рядов, составленных гораздо позднее Юсти (1948 г.) и Мейснером (1955 г.). Через 12 лет (1834 г.) после открытия Зеебека был открыт «эффект Пельтье». Этот эффект является обратным «эффекту Зеебека». Суть «эффекта Пельтье» состоит в том, что при прохождении тока на границах двух разных проводников происходит на одном конце поглощение тепла, а на другом его выделение. Открыл это явление французский физик, метеоролог Пельтье (Peltier) Жан Шарль Атаназ (1785-1845). Кстати, увлечение физикой было своего рода хобби этого человека. Ранее он работал часовщиком фирмы А.Л. Бреге, но благодаря полученному в 1815 г. наследству, Пельтье смог посвятить себя экспериментам в области физики и наблюдению за метеорологическими явлениями. Как и Зеебек, Пельтье не смог правильно интерпретировать результаты своего исследования. По его убеждению полученные результаты служили иллюстрацией того, что при пропускании через цепь слабых токов универсальный закон Джоуля - Ленца о выделении тепла протекающим током не работает.

Только в 1838 г. петербургский академик Ленц Эмилий Христианович (1804-1865) доказал, что «эффект Пельтье» является самостоятельным физическим явлением, заключающимся в выделении и поглощении на спаях цепи добавочного тепла при прохождении постоянного тока. При этом характер процесса (поглощение или выделение) зависит от направления тока.

Двадцать лет спустя Уильям Томсон (впоследствии - лорд Кельвин) дал исчерпывающее объяснение эффектам Зеебека и Пельтье и взаимосвязи между ними. Полученные Томсоном термодинамические соотношения позволили ему предсказать третий термоэлектрический эффект, названный впоследствии его именем. Эффект Томсона заключается в переносе теплоты током, протекающим через однородный материал, в котором создан градиент температуры. Количество переносимой теплоты пропорционально величине этого градиента и силе протекающего тока.

Как показывает опыт, на контакте двух различных металлов образуется двойной электрический слой и соответствующая разность потенциалов (рисунок 1).

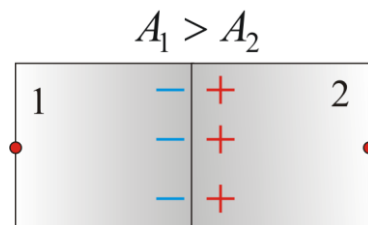


Рисунок 1

Появление двойного электрического слоя обусловлено различием работ выхода электронов из металлов. Работа, которую нужно затратить для удаления электрона из металла в вакуум, называется **работой выхода**. Чем она больше, тем меньше вероятность перехода электронами границы раздела. Поэтому со стороны металла с большей работой выхода накапливается отрицательный заряд, а с противоположной – положительный. Это явление наблюдалось итальянским физиком Александро Вольта (1745 – 1827), который сформулировал два экспериментальных закона, известных как законы Вольта.

1. На контакте двух разных металлов возникает разность потенциалов, которая зависит от химической природы и от температуры спаев.

2. Разность потенциалов на концах последовательно соединенных проводников не зависит от промежуточных проводников и равна разности потенциалов, возникающей при соединении крайних проводников при той же температуре.

Результаты эксперимента можно объяснить с позиции классической электронной теории. Если принять, что потенциал за пределами металла равен нулю, то энергия электрона внутри металла с потенциалом φ_i определится выражением

$$W_i = e\varphi_i. (1)$$

При соединении двух разных металлов с работами выхода (рисунок 2),

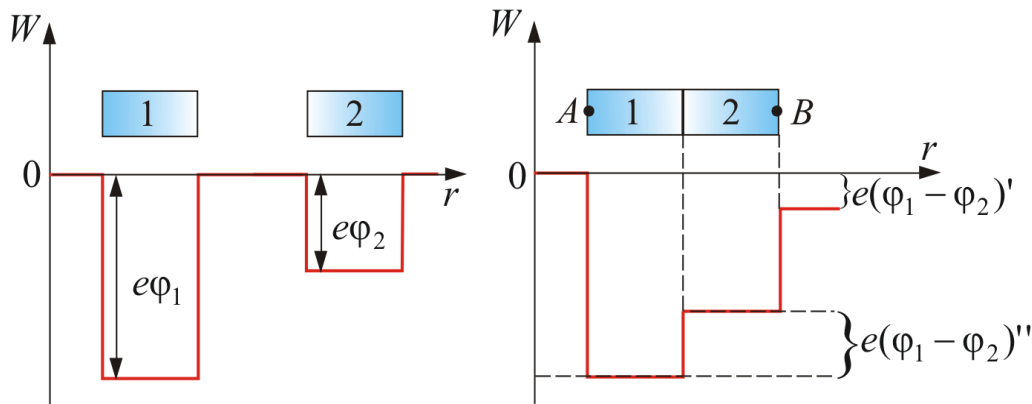


Рисунок 2

$A_1 = e\varphi_1$ и $A_2 = e\varphi_2$ возникает избыточный переход электронов из второго металла в первый, так как $A_2 < A_1$. В результате концентрация электронов n_1 в металле 1 увеличивается, по сравнению с n_2 , что порождает обратный избыточный поток

электронного газа за счет диффузии, противоположной потоку, обусловленному разностью работ выхода.

Установившаяся разность потенциалов в равновесном состоянии определяется как:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = (\varphi_1 - \varphi_2)' + (\varphi_1 - \varphi_2)'',$$

где $(\varphi_1 - \varphi_2)'$ – разность потенциалов, обусловленная разными работами выхода электронов из металлов, а $(\varphi_1 - \varphi_2)''$ – разность потенциалов, возникающая на границе раздела за счет неодинаковой концентрации электронов в электронном газе.

Установившуюся разность потенциалов можно найти из выражения:

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

*Явление возникновения контактной разности потенциалов и ее зависимость от температуры называют **термоэлектрическим эффектом** или **эффектом Зеебека**. Эффект Зеебека (**прямой термоэлектрический эффект**) заключается в появлении разности потенциалов в термопарах.*

Схема термопары состоящей из слоя двух разных металлов 1 и 2, показана на рисунке 3.

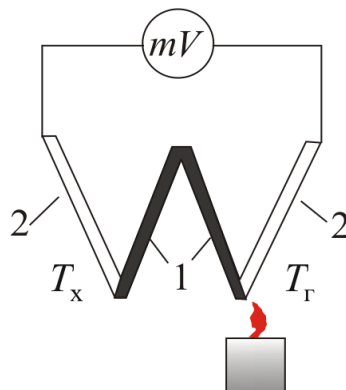


Рисунок 3

На концах термопары возникает термоЭДС термопары E :

$$E = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_x - T_r) = \alpha (T_r - T_x) \quad (2)$$

где T_r – температура горячего спая и T_x – температура холодного спая.

Таким образом $E = \alpha (T_r - T_x)$ – термоЭДС термопары, где $\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$ – постоянная термопары.

Термопары применяют для измерения температуры. Батареи термопар используют как источники ЭДС для питания физических приборов.

Эффектом Пельтье называют **обратный термоэлектрический эффект**. Он заключается в том, что при пропускании тока через термопару, ее спай поглощает или выделяет тепло в зависимости от направления тока. Количество поглощенного тепла пропорционально плотности тока.

$$Q_{II} = \Pi_{12} j (3)$$

где Π_{12} – *коэффициент Пельтье*, зависящий от материала контактирующих металлов. Эффект используют при изготовлении холодильников. Этот термоэлектрический эффект проявляется более эффективно, если используются полупроводники.

Целью работы является измерение термоЭДС методом горячего зонда.

Приборы и материалы: установка для измерения термоЭДС, вольтметр универсальный, источник тока, образец меди, компьютер.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЭДС МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ЗОНДА

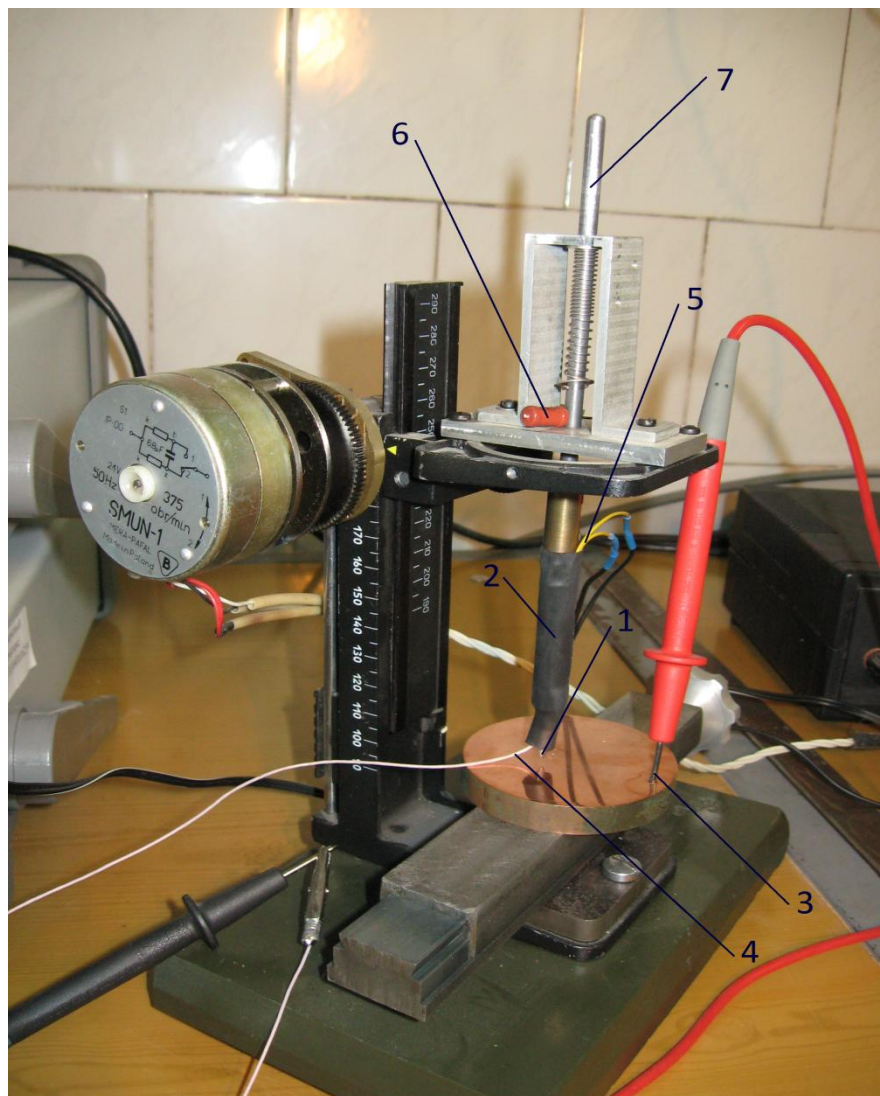


Рисунок 4. Установка для измерения термоЭДС

Установка состоит из семи основных частей: 1 – горячий зонд, представляющий собой острый контакт из стали, 2 – непроводящий нагреватель, помещенный в термоизоляцию, 3, 4 – контакты вольтметра для измерения напряжения в цепи зонд – образец, 5 – контакты от источника тока, подсоединенные к нагревателю (для нагрева нагревателя), 6 – фиксатор стержня, 7 – стержень для приведения в контакт зонда и образца.

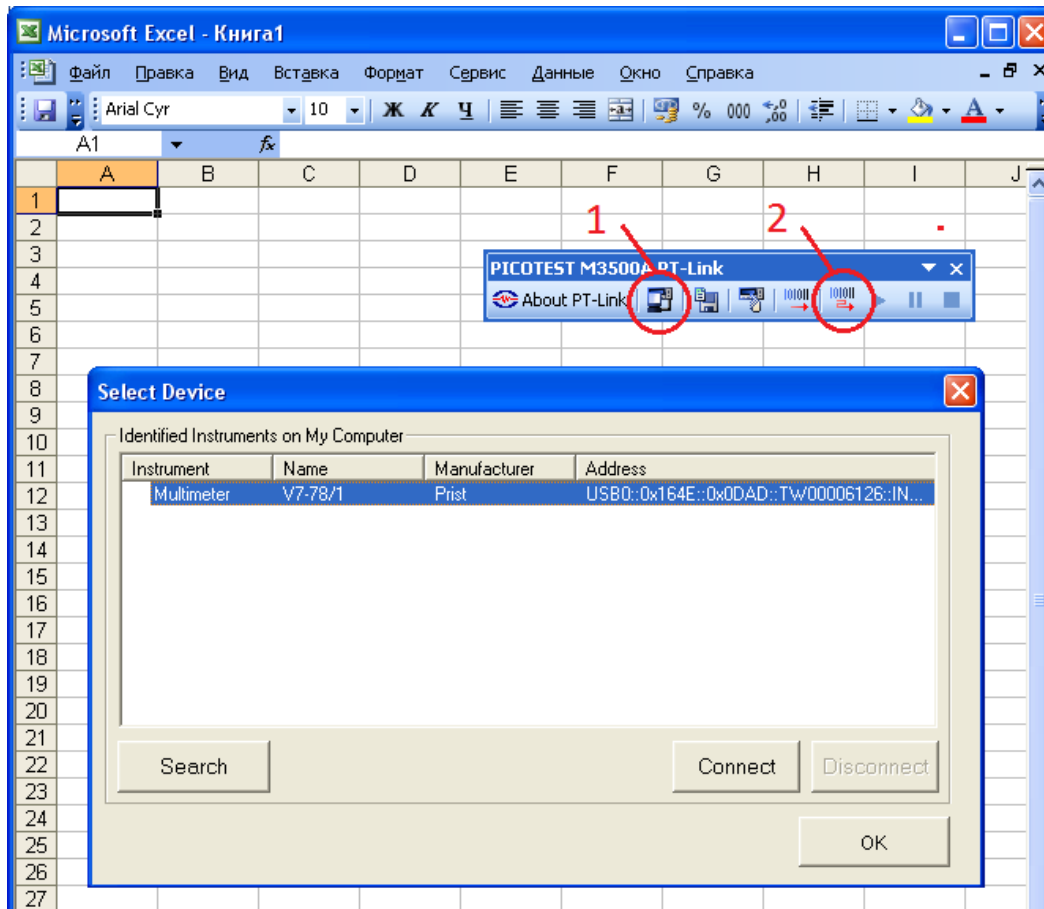
Перед началом эксперимента, включите источник тока (вверху) и вольтметр (внизу). Выберите режим измерения прямого напряжения на вольтметре, нажав клавишу . Для автоматического выбора диапазона значений воспользуйтесь клавишей «АВТО», или в ручную установите пределы, посредством стрелок вверх-вниз.

ХОД РАБОТЫ

Найдите на рабочем столе ярлык
откроется лист Microsoft Excel с
«PICOTEST M3500A PT-Link»:



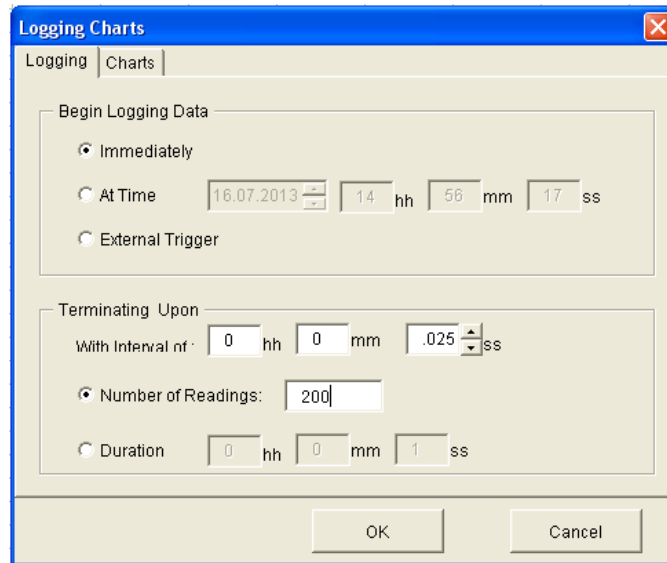
программы, запустите ее. Далее
панелью управления вольтметром



Нажмите кнопку 1, откроется окно «Select Device», в котором щелкните по строке с названием прибора, далее нажмите «Connect» и «OK».

ИЗМЕРЕНИЯ

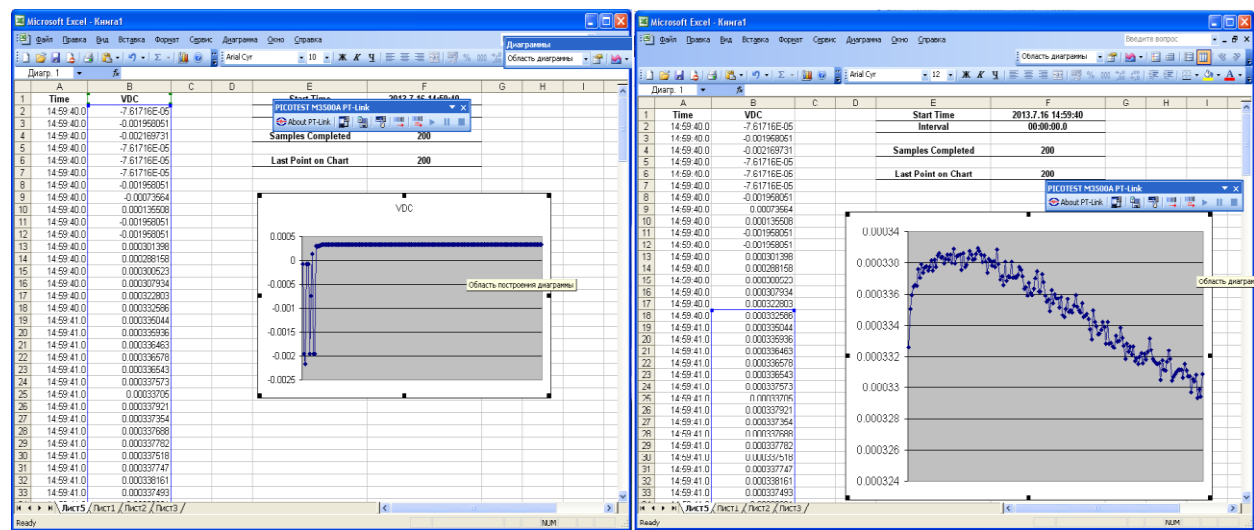
1. Для проведения измерений откройте окно «Logging Charts», нажав кнопку 2. На вкладке «Charts» поставьте метку напротив «Graph». На вкладке «Logging» установите интервал измерения 0,025 секунд и число точек 200.



2. Установите силу тока на источнике питания равную 0,100 А. Подождите пару минут, пока зонд нагреется.

3. Возьмите стержень 7 и уберите фиксатор 6, стержень должен оставаться в руке таким образом, чтобы зонд НЕ касался образца. В окне «Logging Charts» нажмите кнопку «ОК» и сразу же опустите зонд 1 (при помощи стержня 7) на образец. Вольтметр проведет измерения, наберет 200 точек; в это время в Excel будет отображаться график измеряемых значений напряжения. После этого подымите стержень и зафиксируйте его.

4. Когда цепь зонд – образец разомкнута, то вольтметр показывает случайные значения, от которых необходимо избавиться путем выбора данных на диаграмме:



Значение термоЭДС соответствует максимуму, возле которого колеблются точки. В данном случае оно составляет 338 мкВ. После максимума график убывает, так как начинает остывать зонд от соприкосновения с образцом. Повторите измерения 3-5 раз.

Проделаете шаги 1 – 4 для значений силы тока в 0.125 А и 0.150 А. Значения термоЭДС запишите в таблицу 1.

Таблица 1. Значения термоЭДС

№ изм. I, А	0,100	0.125	0.150
	U ₁ мкВ	U ₂ мкВ	U ₃ мкВ
1	U ₁ мкВ	U ₂ мкВ	U ₃ мкВ
2	U ₁ мкВ	U ₂ мкВ	U ₃ мкВ
3	U ₁ мкВ	U ₂ мкВ	U ₃ мкВ

Постройте зависимость термоЭДС (средние значения) от силы тока. Рассчитайте погрешность измерений и нанесите на график доверительный интервал:

1. Оценить среднее арифметическое значение результатов измерений

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i .$$

2. Вычислить среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{(\bar{x} - x_1)^2 + (\bar{x} - x_2)^2 + \dots + (\bar{x} - x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} .$$

3. Выбрать доверительную вероятность $\alpha = 0,95$ (для большинства лабораторных работ в курсе общей физики).

4. По таблице 2 (см. доп. материалы) определить коэффициент Стьюдента $t_{\alpha n}$

5. Определить доверительный интервал (погрешность серии многократных измерений)

$$\Delta \bar{x}_{cl} = t_{\alpha n} \sigma .$$

6. Записать результат в виде: $\bar{x} \pm \Delta \bar{x}_{cl}$ с доверительной вероятностью α .

Для удобства расчетов используйте открытый Microsoft Excel. Планки доверительных интервалов задаются во вкладке «Макет» - «Планки погрешностей» - «Дополнительные параметры планок погрешностей». В открывшемся окне выбирается

«Пользовательская» величина погрешности. Имейте в виду, что вы указываете доверительный интервал для каждой точки на графике, поэтому задаются диапазоны рассчитанных доверительных интервалов, как при построении графика. Так как предлагается выбрать положительные и отрицательные значения ошибок, то доверительные интервалы делятся на два и указываются в окне «Настраиваемые планки погрешностей». Для того чтобы убрать горизонтальные планки выделите их мышкой и нажмите клавишу «Delete».

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ И СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТЬЮДЕНТА

При числе измерений $2 \leq n \leq 10$ доверительный интервал определяется с помощью распределения Стьюдента. Пусть в результате n измерений случайной величины x , подчиняющейся нормальному распределению с параметрами $\bar{x}$ и σ , получены различные значения $x_1, x_2, \dots, x_n$. Английский математик и химик В.С. Госсет (псевдоним Стьюдент) в 1908 году рассмотрел случайную величину вида

$$t = \frac{\bar{x} - \tilde{x}}{\frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}}},$$

где $\tilde{\sigma}$ – среднеквадратичн отклонение результатов измерений от среднего арифметического $\tilde{x}$ в данной серии из n измерений.

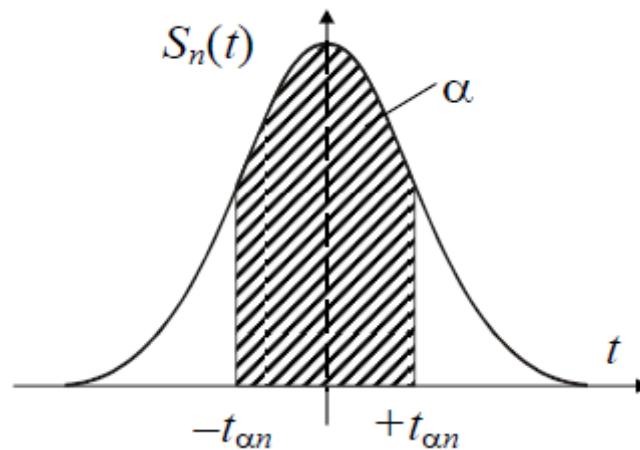


Рисунок 5

Значения $\bar{x}$ и σ зависят от числа измерений n . Поэтому при числе n_1 измерений величина t принимает числовое значение t_1 , при n_2 – значение t_2 и т.д. Стьюдент получил закон распределения (плотность вероятности) $S_n(t)$ случайной величины t . Это некоторая математическая функция от n и t . Закон Стьюдента – это закон распределения ошибок измерений нормальных (Гауссовских) случайных величин. Эта функция (плотность вероятности) имеет максимум при $t = 0$, когда $\bar{x} = \tilde{x}$. На рисунке 5 приведено распределение Стьюдента. Интервалу значений величины x , симметричному относительно $\bar{x}$, соответствует интервал значений переменной t , симметричный относительно нуля. Обозначим вероятность того, что величина t принимает значение из некоторого интервала от $-t_{an}$ до $+t_{an}$, через α (заштрихованная площадь на рисунке 5). Если при некотором числе измерений n задать значение доверительной вероятности α , то используя функцию $S_n(t)$, можно рассчитать границы соответствующего симметричного интервала t_{an} , который зависит от α и n

$$\alpha = \int_{-t_{an}}^{+t_{an}} S_n(t) dt .$$

Значения t_{an} называют **коэффициентами Стьюдента**, они приведены в таблице 2 для разных значений доверительной вероятности α и количества n измерений.

Таблица 2. Коэффициенты Стьюдента (часть полной таблицы)

$\alpha \backslash n$	0,9	0,95	0,999
2	6,31	12,7	636.6
3	2,92	4,30	31.6
4	2,35	3,18	12.9
5	2,13	2,78	8.61
6	2,02	2,57	6.37
7	1,94	2,45	5.96
8	1,89	2,36	5.41
9	1,86	2,31	5.04
10	1,83	2,26	4.78
∞		1,96	3

Для известного числа опытов n и доверительной вероятности α определим коэффициент Стьюдента t_{an} , который соответствует максимальному отклонению среднего арифметического от истинного значения. Максимальное отклонение $\tilde{x}$ от $\bar{x}$ равно длине доверительного интервала $\Delta \tilde{x}$. Тогда на основании определения величины t получим

$$t_{\alpha n} = \frac{\bar{x} - \tilde{x}}{\tilde{\sigma}} \Big|_{\max} = \frac{\Delta \tilde{x}}{\tilde{\sigma}} \Rightarrow \Delta \tilde{x} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma}.$$

Здесь $\Delta \tilde{x}$ – граница доверительного интервала для непрерывной случайной величины x , подчиняющейся нормальному распределению, при небольшом числе n измерений и при данной доверительной вероятности α ; $t_{\alpha n}$ – коэффициент Стьюдента для n измерений при доверительной вероятности α ; $\tilde{\sigma}$ – среднеквадратичное отклонение результатов измерений от среднего арифметического $\tilde{x}$ в данной серии измерений.

В пределе при $n \rightarrow \infty$ распределение Стьюдента переходит в нормальное (распределение Гаусса). Практически при одинаковой доверительной вероятности α коэффициенты $t_{\alpha n}$ и k_{α} совпадают уже при $n \geq 50$. Таким образом, случайную погрешность (доверительный интервал) $\Delta \tilde{x}$ при малом числе измерений следует вычислять, используя коэффициент Стьюдента $t_{\alpha n}$, $\Delta \tilde{x} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma}$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое работа выхода электронов из металла?
2. Что такое контактная разность потенциалов и как она возникает?
3. В каком случае возникает термоЭДС и от каких параметров она зависит?
4. Что такое термопара и как она изготавливается?
5. Что собой представляет термоЭДС?
6. Как определяется термоЭДС в условиях опытов (вывод формулы).
7. Что означают величины входящие в постоянную термоЭДС.
8. В чем заключается метод горячего зонда?
9. Для чего служит распределение Стьюдента?
10. Что такое коэффициент Стьюдента?

ГЛОССАРИЙ

Термо-эдс

Термоэлектродвижущая сила.

Работа выхода

Работа, которую нужно затратить для удаления электрона из металла в вакуум.

Эффект Зеебека (термоэлектрический эффект)

Явление возникновения контактной разности потенциалов и ее зависимость от температуры.

Эффект Пельтье

Обратный термоэлектрический эффект. При пропускании тока через термопару, ее спай поглощает или выделяет тепло в зависимости от направления тока.

Эффект Томсона

Перенос теплоты током, протекающим через однородный материал, в котором создан градиент температуры.

Термопара

Термометр, состоящий из двух разнородных металлических проводников, соединенных концами. На одном конце проводников поддерживается постоянная температура. Другой конец - место спайки - погружается в вещество, температуру которого требуется измерить.

Постоянная термопары

Характеристика термопары, коэффициент пропорциональности между разностью потенциалов и разностью температур на концах термопары.

Коэффициент Пельтье

Коэффициент пропорциональности между количеством поглощенного тепла и плотностью тока.

Метод горячего зонда

Метод измерения термо-эдс основанный на соприкосновении горячего зонда с поверхностью образца из другого материала. В результате чего, появляется эффект Зеебека.

Непроводящий нагреватель

Нагреватель выполненный из резистора большого сопротивления, который позволяет нагревать зонд без подачи напряжения на него.

Термоизоляция

Изоляция снижающая быструю потерю тепла от нагревателя, делает температуру зонда постоянной.

Распределение Стьюдента

Представляет собой сумму нескольких нормально распределенных случайных величин.

Среднеквадратическое отклонение

Показатель рассеивания значений случайной величины относительно её математического ожидания. Используют при расчёте стандартной ошибки среднего арифметического, при построении доверительных интервалов.

Доверительный интервал

Интервал, который с заданной вероятностью α содержит оцениваемый параметр (значение термо-эдс).

Доверительная вероятность

Вероятность найти измеряемую величину в данном доверительном интервале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов С.И. Электростатика. Постоянный ток. Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 119с.
2. Кравченко Н.С. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие /Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 88 с.
3. Седалищев В.Н. Физические основы получения информации: учебное пособие/Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. – Ч.1. Генераторные и параметрические измерительные преобразователи. – 283с.