



Санкт-Петербургский
государственный
университет

Научный парк



*Образовательный ресурсный центр по направлению физика
Первая физическая лаборатория*

А.Г. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОПАРЫ

**Учебно-методическое пособие
(описание лабораторной работы)**

№ 55

Санкт-Петербург

2014

УДК 536.2

Рецензенты: д. ф.-м. н., профессор С.В. Карпов, д. ф.-м. н., профессор И.Ч. Машек.

Рекомендовано к печати Ученым советом физического факультета СПбГУ (выписка из протокола № 11 заседания Ученого совета физического факультета СПбГУ от 15.10.2013 г.).

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов СПбГУ младших курсов естественно-научных направлений обучения, а также может быть полезно учащимся и преподавателям средних и средне-специальных учебных заведений.

Лабораторная работа выполняется на оборудовании Образовательного ресурсного центра по направлению физика Научного парка СПбГУ (<http://researchpark.spbu.ru>).

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Теоретические основы	5
1.1 Термоэлектрический эффект	5
1.2 Конструкция и применение термопары	8
1.3. Компенсационный метод	11
2. Методика проведения эксперимента	13
3. Техника безопасности по работе с приборами	21
4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	22
4.1 Градуировка термопары.....	22
4.2 Самостоятельное изготовление термопары	25
5 Обработка результатов эксперимента.....	27
6. Контрольные вопросы.....	29
Список рекомендованной литературы и справочные данные	30

Введение

Температура — это физическая величина, характеризующая среднюю кинетическую энергию частиц макроскопической системы в состоянии термодинамического равновесия.

Существуют различные типы термометров — приборов для измерения температуры, основным принципом работы которых является выбор некоторого параметра вещества, изменение которого однозначно связывается с изменением температуры. Классическим примером термодинамического термометра может служить жидкостный термометр, основанный на принципе изменения объёма жидкости (обычно это спирт или ртуть) при изменении температуры окружающей среды.

Термопара — это термометр, построенный на основе термоэлектрических эффектов, возникающих при контакте двух различных металлов или полупроводников. Её отличает широкий диапазон измеряемых температур (от $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$), высокая точность, простота изготовления и надёжность.



Рис. 1. Термопара производства LD Didactics, используемая для измерения температуры в других лабораторных работах.

В данной работе Вам предлагается исследовать работу термопары медь–константан и провести ее градуировку для получения полноценного измерительного прибора, при этом саму термопару можно взять готовой или изготовить самостоятельно.

Термометры на основе термопар широко используются в автоматизированных измерениях и сборе данных физических экспериментов, поэтому важно понимание принципов работы термопары и методов измерения температуры с ее помощью.

1. Теоретические основы

1.1. Термоэлектрический эффект

Явление возникновения электродвижущей силы (ЭДС) в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединённых проводников из различных материалов, места соединений которых находятся при различных температурах, называется *термоэлектрическим эффектом*.

Электродвижущие силы возникают благодаря тепловому движению свободных электронов (или дырок) в месте контактов разнородных проводников, а также в самих проводниках.

Эффект возникновения термоэдс открыл Томас Иоганн Зеебек в 1821 г. Возникновение этого эффекта вызвано несколькими составляющими.

На границе двух проводников А и В вследствие теплового движения возникают встречные потоки электронов. Если число электронов в единице объема каждого проводника неодинаково, скажем, $n_A > n_B$, то поток из А в В будет более интенсивным, чем из В в А, и число электронов в В начнет возрастать. Это приведет к понижению потенциала проводника В, и возникшая разность потенциалов выровняет электронные потоки.

Найдем разность потенциалов $U_A - U_B$, которая установится, когда будет достигнуто равновесие. Потенциальная энергия электронов в проводниках А и В равна $-eU_A$ и $-eU_B$ соответственно, где e — заряд электрона.

Контактный слой между А и В можно рассматривать как потенциальный барьер — потенциальная энергия электронов в этом слое W выше, чем внутри обоих проводников.

Электрон, движущийся из А в В, может преодолеть барьер, если его кинетическая энергия будет больше, чем разность потенциальных энергий $W + eU_A$ между металлом А и контактном слое; концентрация таких электронов и, следовательно, число электронов, пересекающих границу раздела в единицу времени, по закону Максвелла–Больцмана пропорциональна $n_A \exp\left(-\frac{(W + eU_A)}{kT}\right)$,

(k — постоянная Больцмана, T — температура). Аналогично поток электронов из В в А пропорционален $n_B \exp(-\frac{(W + eU_B)}{kT})$. Условие равенства потоков дает:

$$n_A \exp(-\frac{(W + eU_A)}{kT}) = n_B \exp(-\frac{(W + eU_B)}{kT}),$$

откуда

$$U_A - U_B = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}.$$

Если из проводников А и В составлена замкнутая цепь, оба контакта которой находятся при одинаковой температуре, то скачки потенциала на контактах одинаковы по абсолютной величине, и ЭДС в цепи равна нулю (этот результат не зависит от конкретной формулы, а является следствием второго начала термодинамики: если бы в цепи из проводников первого рода, не испытывающих при этом химических изменений, все части которой имеют одинаковую температуру, существовала отличная от нуля ЭДС, эта цепь была бы вечным двигателем второго рода).

Если же температуры контактов неодинаковы, то в цепи возникает ЭДС:

$$\varepsilon_{\text{конт}} = (U_A - U_B)_1 - (U_A - U_B)_2 = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_A}{n_B}. \quad (1)$$

Направление (знак) ЭДС легко установить, учитывая, что диффузия гонит электроны из металла, более богатого электронами, в более бедный, причем этот поток сильнее в горячем спае ($\varepsilon_{\text{конт}} > 0$, когда $n_A > n_B$).

Вторая составляющая термоэдс связана с наличием градиента температуры в каждом из проводников А и В. Если вдоль проводника существует градиент температуры, то электроны на горячем конце приобретают более высокие энергии и скорости, чем на холодном; в полупроводниках, в дополнение к этому, концентрация электронов проводимости растет с температурой. В результате возникает поток электронов от горячего конца к холодному, и на холодном конце накапливается отрицательный заряд, а на горячем остаётся некомпенсированный положительный заряд. ЭДС, возникновение которой описывается данным механизмом, называется объёмной ЭДС. Процесс накопления заряда продолжается

до тех пор, пока возникшая разность потенциалов не вызовет поток электронов в обратном направлении, равный первичному, благодаря чему установится равновесие.

Действительно, давление электронного газа в каждой точке проводника, например А, равно $p = n_A kT$, и градиент температуры $\frac{dT}{dx}$ приводит к градиенту

давления $\frac{dp}{dx} = n_A k \frac{dT}{dx}$, где координата x отсчитывается вдоль проводника.

На цилиндр с площадью основания S и высотой dx действует сила, пропорциональная разности давлений на его основания

$$dF_A = -\frac{dp}{dx} S dx = -n_A k \frac{dT}{dx} S dx.$$

Таким образом, на каждый электрон действует "сторонняя" (не электрическая) сила $f_A = -\frac{dF_A}{n_A S dx} = -k \frac{dT}{dx}$. Такая же сила могла бы быть создана электро-

статическим полем напряженности $E_{\text{стор}} = \frac{f_A}{-e} = \frac{k}{e} \frac{dT}{dx}$.

Это так называемая напряженность сторонних сил. Работа сторонних сил по перемещению электронов вдоль всего проводника, отнесенная к единице заряда, называется электродвижущей силой (ЭДС), действующей в этом проводнике:

$$\varepsilon_A = \int_{x_1}^{x_2} E_{\text{стор}} dx = \frac{k}{e} \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{k}{e} (T_2 - T_1), \quad (2)$$

где x_1 и x_2 — координаты концов проводника. Аналогично в проводнике В:

$$\varepsilon_B = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \quad (3)$$

(обходя цепь по замкнутому контуру, мы идем от точки 1 к точке 2 в проводнике А и от 2 к 1 в проводнике В).

Полная ЭДС в цепи:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{конт}} + \varepsilon_A + \varepsilon_B. \quad (4)$$

Согласно (2)–(3) $\varepsilon_A + \varepsilon_B = 0$, тогда полная ЭДС выражается формулой (1).

Однако это результат применения классической теории и модели идеального электронного газа. При строгом описании движения электронов в проводниках величины ε_A и ε_B зависят от рода металла или полупроводника и, как правило, полностью не компенсируются, так что в формуле (4) следует учитывать все слагаемые.

Формула (1) дает удовлетворительную оценку термоэдс для полупроводников, в которых концентрация свободных носителей заряда мала, так что к ним применимо классическое распределение Максвелла–Больцмана. В металлах классическое приближение совершенно непригодно. Сравнение формулы (1) с выражениями, полученными на основе квантовой механики, показывает, что классическая теория правильно предсказывает знак термоэдс, но преувеличивает порядок величины. Кроме того, в классической теории $\varepsilon_{\text{конт}}$ пропорциональна разности температур, а в квантовой — коэффициент пропорциональности сам пропорционален температуре $T_{\text{ср}} = \frac{T_2 + T_1}{2}$. Объемные слагаемые термоэдс в квантовой теории зависят не только от равновесных свойств электронного газа, но и от подвижности электронов, именно поэтому $\varepsilon_A + \varepsilon_B \neq 0$. Величина $\varepsilon_A + \varepsilon_B$ может быть как меньше, так и больше ε , но обычно сравнима с ε по порядку величины. Знак $\varepsilon_A + \varepsilon_B$ может не совпадать со знаком $\varepsilon_{\text{конт}}$. Поскольку разные слагаемые в формуле (4) могут иметь неодинаковую температурную зависимость, то температурный ход ε бывает очень сложным. Чаще всего при $T_2 = \text{const}$ зависимость ε от T_1 изображается параболой, наклон которой растет с ростом T_1 . Однако встречаются и такие пары металлов, для которых $\frac{d\varepsilon}{dT_1}$ убывает с ростом T_1 и даже меняет знак (так называемая инверсия).

1.2 Конструкция и применение термопары

Система из двух разнородных проводников, спаянных концами и дающих

заметную термоэдс, когда спаи имеют разные температуры, называется термопарой или термоэлементом. Первое название обычно используют, когда такая система применяется для измерения температуры, второе — к термоэлектрическим источникам энергии.

Величины термоэдс для большинства металлов измеряются микровольтами на градус. Такие ЭДС слишком малы для практического использования в качестве источников энергии, но ими очень удобно пользоваться для измерений температуры. Термопары в особенности полезны для измерения температуры в труднодоступных для обычных термометров местах или в очень малых объемах, кроме того, термопары из очень тонких проволочек малоинерционны и позволяют следить за сравнительно быстрыми изменениями температуры.

Для полупроводников, к которым можно приближенно применять формулу (1), достижимы ЭДС порядка милливольт на градус, и полупроводниковые термоэлементы находят применение как источники электроэнергии для мало-мощных устройств удаленной телеметрии, мобильных и компьютерных устройств.

Для изготовления измерительных термопар выбираются пары металлов или сплавов, дающие достаточно большие, стабильные и воспроизводимые термоэдс. Для наиболее точных измерений, а также для работы при очень высоких температурах (до 1700 °С) применяются не очень чувствительные, но высокостабильные термопары из платины и сплава платины с родием. Большой термоэдс с хорошей стойкостью к высоким температурам (до 1400 °С) обладают термопары хромель–алюмель (сплавы никеля с хромом и алюминия). При более низких температурах (до 400 °С) хорошо работает термопара медь–константан (60% Cu, 40% Ni), особенно удобная тем, что она изготавливается из хорошо распространенных электротехнических материалов.

Измерительный прибор или электронную измерительную систему подключают либо к концам двух проводников (рис. 2а), либо в разрыв одного из них (рис. 2б).

При этом один из спаев является рабочим — он помещается в объект, температуру которого мы измеряем T_1 , а второй спай является опорным и должен

находиться при известной температуре T_2 , что достигается использованием либо так называемых постоянных температурных точек — фазовых переходов с хорошо известной температурой (например, плавление льда — $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нормальных условиях), либо измерением температуры опорного спая другим датчиком температуры и внесением соответствующих поправок в измеренные данные.

Термоэдс сильно зависит от состава проводников, а также от деталей кристаллической структуры, в частности, от наличия механических напряжений. Следовательно, термопары требуют индивидуальной градуировки. Для ее облегчения пользуются справочными таблицами (например, Таблица 1), составленными по усредненным данным для большого числа термопар данного типа.

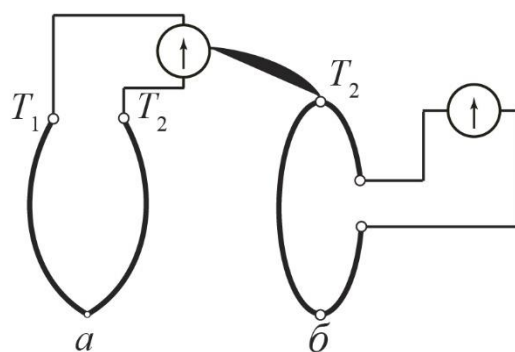


Рис. 2. Подключение измерительного прибора к термопаре.

При наличии такой таблицы градуировка термопары сводится к определению индивидуальных поправок к ε при нескольких температурах. Поправки $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{измер}} - \varepsilon_{\text{табл}}$ достаточно малы, а график $\Delta\varepsilon(\varepsilon_{\text{измер}})$ обычно близок к прямой линии. Поэтому достаточно определить $\Delta\varepsilon$ в небольшом числе точек (3–5), построить указанный график и по нему отсчитывать поправки для любых значений $\varepsilon_{\text{измер}}$.

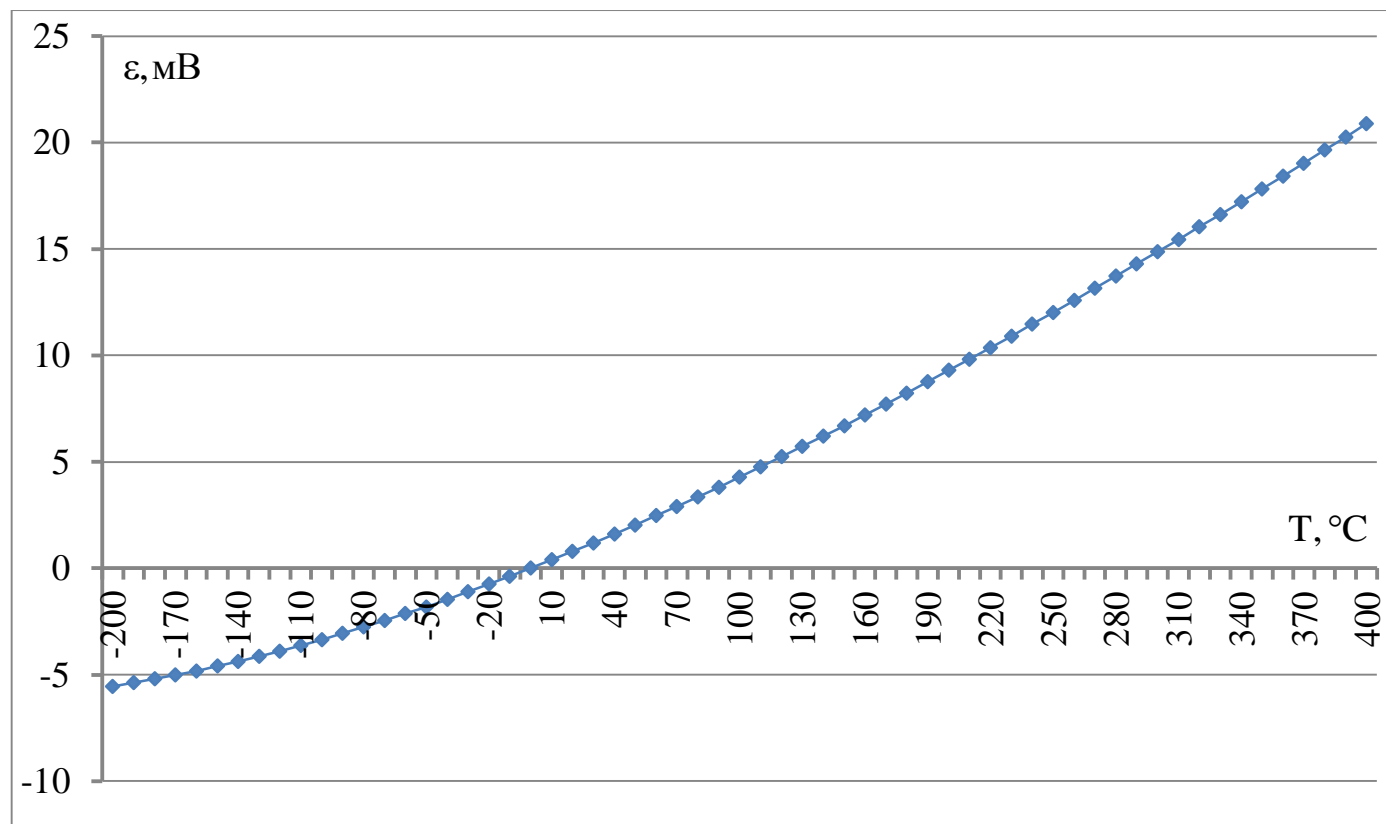
Таблица 1.

Зависимость ЭДС (мВ) термопары медь–константан от температуры ($^{\circ}\text{C}$) рабочего спая термопары при температуре опорного спая $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$T, ^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
–200	–5,54	–	–	–	–	–	–	–	–	–
–100	–3,35	–3,62	–3,89	–4,14	–4,38	–4,60	–4,82	–5,02	–5,20	–5,38
–0	0,00	–0,38	–0,75	–1,11	–1,47	–1,81	–2,14	–2,46	–2,77	–3,06
0	0	0,39	0,79	1,19	1,61	2,03	2,47	2,91	3,36	3,81
100	4,28	4,75	5,23	5,71	6,2	6,7	7,21	7,72	8,23	8,76
200	9,29	9,82	10,36	10,91	11,46	12,01	12,58	13,14	13,71	14,28
300	14,86	15,44	16,03	16,62	17,22	17,82	18,42	19,03	19,64	20,25

400	20,87	—	—	—	—	—	—	—	—	—
-----	-------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Градуировочный график, построенный по Таблице 1.



1.3. Компенсационный метод

Для измерения малых величин термоэдс будет необходимо воспользоваться методом компенсации. *Компенсационными* (нулевыми) называют методы измерения электрических величин, в которых путем изменения известной величины устанавливается равенство потенциалов регулируемого и измеряемого источниками ЭДС и наблюдается отсутствие тока в цепи индикаторного прибора — гальванометра (отсутствие отклонения стрелки), что означает равенство значений самих величин. *Метод компенсации* — это электрический аналог рычажных весов.

Для получения регулируемого напряжения в большинстве компенсационных методов используется делитель напряжения или *потенциометр*. Величину напряжения ε , снимаемого с участка потенциометра можно рассчитать, зная сопротивление этого участка цепи r и протекающий по нему ток I . Это напряжение в компенсационной схеме сравнивается с измеряемой разностью потенциалов ε_x .

В этой цепи через индикатор (гальванометр) будет течь ток, зависящий от разности $\varepsilon - \varepsilon_x$ и от полного сопротивления измерительной цепи $R_{\text{изм}}$.

Изменяя сопротивление участка r , можно добиться равенства напряжений ε и ε_x . В этом случае ток через гальванометр не будет проходить. Отсутствие тока в гальванометре означает, что $\varepsilon = \varepsilon_x = IR_{\text{изм}}$.

Точность измерения разности потенциалов (величина отклонения стрелки гальванометра) зависит от тока в измерительной цепи и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи. Введя в измерительную цепь дополнительное переменное сопротивление, можно измерять чувствительность гальвано-

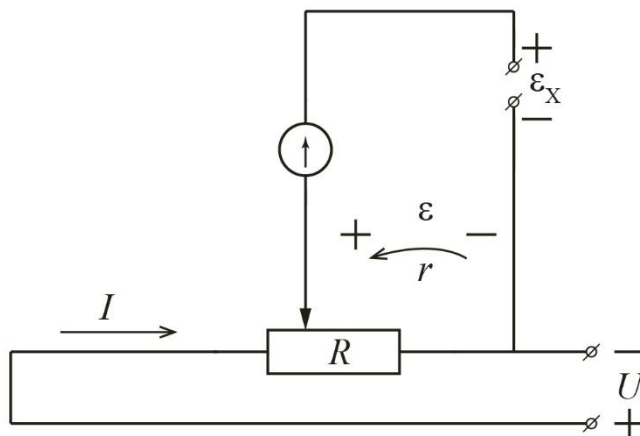


Рис. 3. Схема метода компенсации.

метра. Большие разности потенциалов некомпенсированной схемы приводят к большим отклонениям стрелки прибора, в том числе за границы шкалы измерения. Грубую компенсацию разности потенциалов проводят при большом добавочном сопротивлении, для более точного нахождения нуля сопротивление следует уменьшать вплоть до минимума.

Включая эталонный источник ε_0 вместо измеряемого напряжения и добиваясь компенсации, находим $I = \varepsilon_0 / r_0$, где r_0 — значение сопротивления r при компенсации ЭДС нормального элемента. Теперь любое напряжение рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 r_x / r_0, \quad (5)$$

где r_x — значение сопротивления r при компенсации измеряемого напряжения ε_x . Рабочий ток знать не требуется, нужно только чтобы компенсация обоих напряжений происходила при одном и том же токе.

2. Методика проведения эксперимента

Термопара уже подготовлена для проведения эксперимента и закреплена на штативе. При желании такую же термопару можно изготовить самостоятельно, выполнив сварку двух проволок дугой в соляном растворе, как описано ниже (п. 4.2). Для этого следует обратиться к инженеру.



Рис. 4. Исследуемая термопара.

Термопара спаяна из медной и константовой проволоки. Рабочий сплав термопары в процессе проведения эксперимента необходимо привести в соприкосновение или погрузить в исследуемый объект, а опорный спай — в емкость с тающим льдом. Оба спая термопары одинаковы, чтобы определить какой из них рабочий, а какой — опорный, необходимо выбрать желаемую полярность

термопары (знак термоэдс). Перемещать горизонтальную планку, на которой закреплена термопара, можно расслабив и после затянув зажимной винт на штативе.

В комплектацию работы входят следующие емкости (рис. 5) для исследуемых веществ: сосуд Дьюара для жидкого азота, калориметр для льда, колба для кипячения воды, тигель для плавления олова. Перед началом работы все необходимые вещества для проведения эксперимента по емкостям распределит инженер лаборатории.



Рис. 5. Калориметр, колба, сосуд Дьюара, плитка (слева направо сверху). Щипцы, тигель (слева направо внизу).

Рабочий спай термопары погружается в азот, и дьюар закрывается плотной крышкой так, чтобы жидкий азот находился в равновесии с собственным паром при атмосферном давлении. Вода кипятится в колбе на электроплитке, спай термопары помещается в парах кипящей воды вблизи от ее поверхности. Олово расплавляется в фарфоровом тигельке на электроплитке.

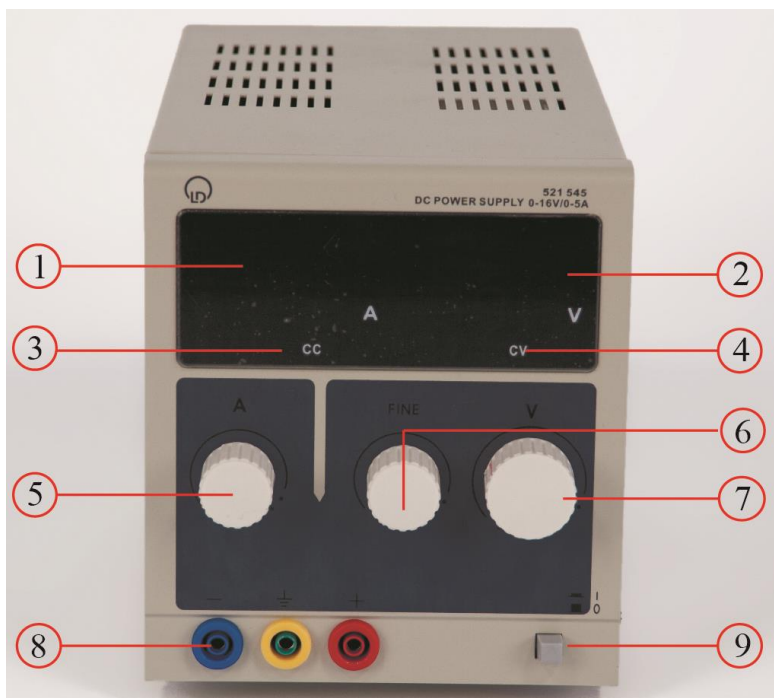
Калориметр, сосуд Дьюара, а также другие приборы с пластиковыми легкоплавкими элементами не рекомендуется размещать около нагревательной плитки и тем более на ней! Допускается нахождение на плитке только

колбы с водой и тигля для олова. **После снятия тигля с плитки до остывания его следует размещать на керамических подставках.** Эти подставки также можно подкладывать для регулировки по высоте положения сосудов с измеряемыми жидкостями.

Измерение величины термоэдс выполняется методом компенсации, для чего используется: блок питания, реохорд, магазины сопротивлений, ключи, гальванометр и нормальный элемент.

Блок питания (рис. 6) имеет выключатель (9), индикаторы тока (1) и напряжения (2), ручку регулировки тока (5) в диапазоне 0–5 А, ручку плавной (6) и грубой (7) регулировки напряжения в диапазоне 0–15 В, индикаторы работы в режиме источника постоянного тока (3) или в режиме постоянного напряжения (4), клеммы для подключения схемы (8).

В работе блок питания должен быть установлен в режим стабилизации напряжения, для этого перед включением ручку регулировки тока (5) следует повернуть до упора по часовой стрелке, ручки регулировки напряжения (6) и (7) — против часовой стрелки. **Включение блока**



питания разрешено

Рис. 6. Блок питания.

только после проверки правильности сборки схемы преподавателем или инженером. Рекомендуемое значение напряжения 3,00 В, его следует установить до начала сборки схемы сначала ручкой грубой (7), а потом — плавной (6) регулировки.

Переменные сопротивления собираются из наборных блоков, соединяемых последовательно. Блоки имеют разные номиналы сопротивления, которые

можно изменять по шагам (10 шагов). Обратите внимание на максимально допустимый ток через каждый блок. Его превышение вызовет выход сопротивления из строя (перегорание). Если вы случайно превысили указанное значение, немедленно отключите блок питания кнопкой выключения.

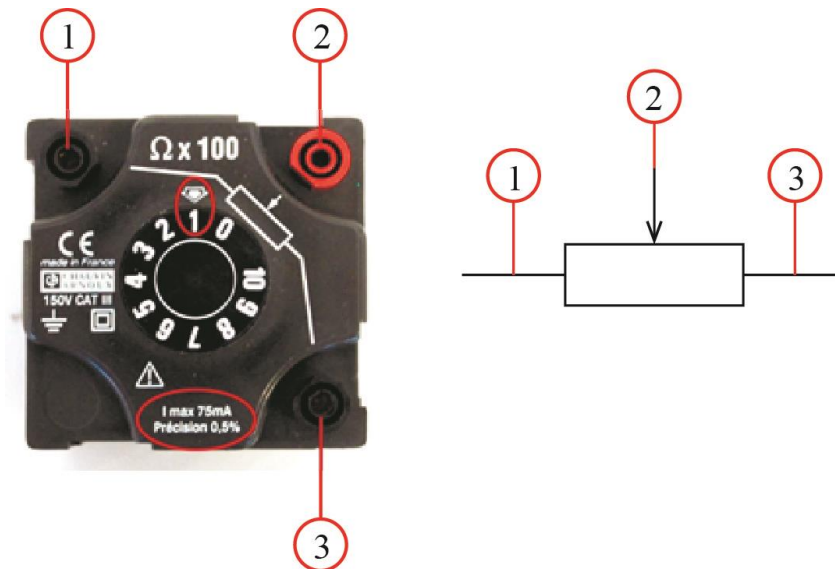


Рис. 7. Внешний вид и схема блока сопротивлений.

Каждый блок (рис. 7) имеет три клеммы. Значение сопротивления между крайними (черными) клеммами не зависит от положения ручки и равно максимально возможному сопротивлению $10 \times R_{\text{шаг}}$.

Доступны блоки с шагом 100 Ом; 10 Ом; 1 Ом и 0,1 Ом. Значение сопротивления между выводами (1) и (2) изменяется вращением ручки, пропорционально шагу N (от 0 до 10), указанному напротив метки, и равно $N \times R_{\text{шаг}}$. Сопротивление между выводами (2) и (3) равно $(10 - N) \times R_{\text{шаг}}$. Вывод (3) в работе не используется.

Для сборки переменных сопротивлений последовательно соедините выводы (1) и (2) четырех блоков сопротивлений в группу — *магазин сопротивлений*. Сотни, десятки, единицы и десятые знаки полного сопротивления магазина легко читаются по положениям ручек (рис. 8 и рис. 9).

Потенциометр собирается из двух магазинов сопротивлений. Для получения малых напряжений его можно построить на основе реохорда (рис. 10) — длинной проволоки с достаточно высокой степенью однородности, чтобы можно

было считать сопротивление любого участка пропорциональным его длине. Проволоку натягивают вдоль линейки со шкалой, по которой можно отсчитывать положение скользящего контакта.



Рис. 8. Значение полного сопротивления магазина 123,5 Ом.



Рис. 9. Потенциометр с полным сопротивлением 800 Ом, напряжение снимается с участка 654,3 Ом, изменение выполняется синхронно.

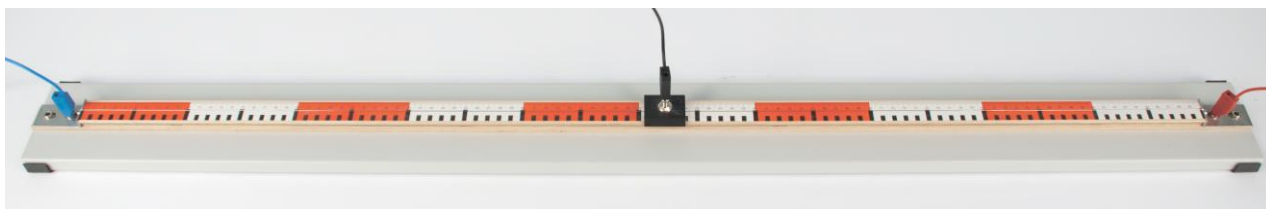


Рис. 10. Реохорд.

Поскольку удельное сопротивление проволоки достаточно мало (полное сопротивление реохорда составляет несколько единиц Ома), то точность сопротивления, выставляемого движком реохорда, составляет тысячные доли Ома.

В качестве эталонного источника используется *нормальный элемент* —

специально изготовленный гальванический элемент Вестона (рис. 11). Электродвижущая сила такого элемента при постоянной температуре устойчива и определена с высокой степенью точности, а при изменении температуры меняется очень мало. Значения ЭДС нормальных элементов (около 1,0186 В при 20 °С) несколько различаются от экземпляра к экземпляру и при повышении температуры на 1 °С уменьшается менее, чем на 0,0001 В. Значение ЭДС для конкретного прибора указано на его корпусе. Внутреннее сопротивление нормального элемента порядка 1000 Ом.

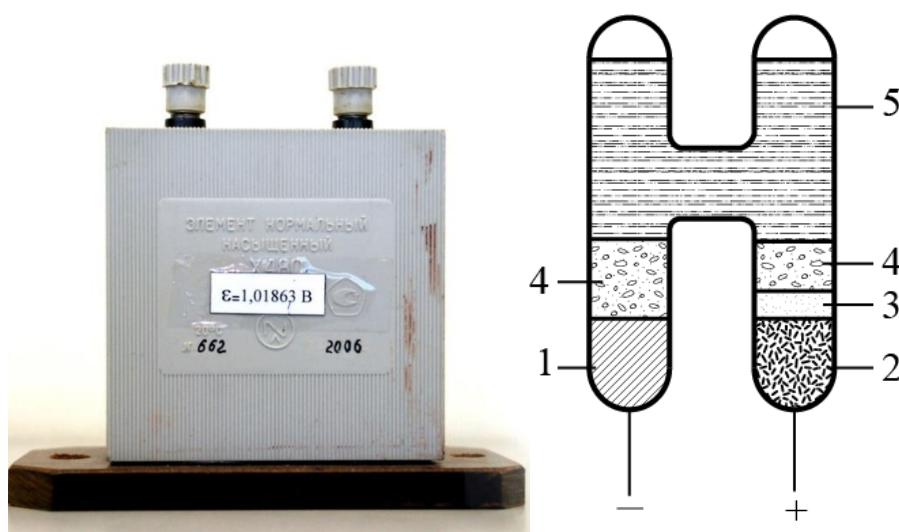


Рис. 11. Внешний вид и устройство нормального элемента Вестона.

Положительный электрод (рис. 11) — ртуть (2), контактирующая с пастами из кристаллов сульфата ртути Hg_2SO_4 (3) и гидрата сульфата кадмия $\text{CdSO}_4 \times 8/3\text{H}_2\text{O}$ (4). Отрицательный электрод — амальгама (раствор в ртути) кадмия (1), контактирующая с пастой из кристаллов гидрата сульфата кадмия $\text{CdSO}_4 \times 8/3\text{H}_2\text{O}$ (4). Электролит (5) — раствор сульфата кадмия CdSO_4 , чаще всего с небольшой добавкой серной кислоты. Все применённые материалы отличаются высокой чистотой, что обязательно для достижения высокой стабильности элементов. **Наклонять и переворачивать нормальный элемент запрещено! Это может привести к разливу ртути и электролита.**

Для проведения измерения методом компенсации собирается схема, представленная на рис. 12.

Напряжение термоэдс ε_T достаточно мало, поэтому для его точной ком-

пенсации будем использовать реохорд, позволяющий регулировать сопротивление с точностью до тысячных долей Ома. Напряжение для компенсации снимается с его участка AC.

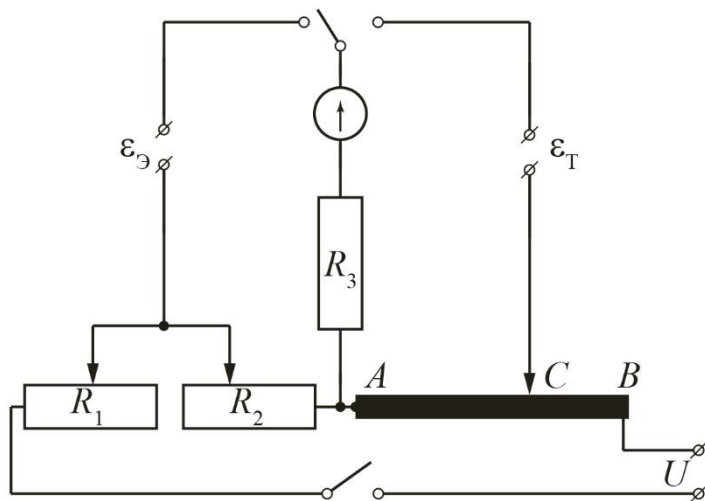


Рис. 12. Схема электрическая принципиальная.



Рис. 13. Гальванометр.

Напряжение эталонного источника много больше напряжения термопары $\varepsilon_{\text{э}} \gg \varepsilon_{\text{т}}$, поэтому для его компенсации нам потребуется потенциометр с большим сопротивлением (сотни Ом). Он собирается из наборных переменных сопротивлений R_1 и R_2 .

Таким образом, в схеме у нас есть два плеча, аналогичных простой схеме компенсации (рис. 12), переключаемых ключом, отдельно для компенсации ЭДС термопары и отдельно для компенсации ЭДС эталонного источника. При этом через потенциометры протекает одинаковый ток

$$I = U / (R_1 + R_2 + R_{\text{реохорда}}). \quad (6)$$

В формуле (5) нужно теперь считать $r_{\text{э}} = R_2$, а $r_{\text{х}} = \rho l_{\text{х}} / L$, где ρ — полное сопротивление реохорда, L — максимальная длина проволоки по шкале реохорда в крайнем положении, $l_{\text{х}}$ — длина её отрезка AC, с которого снимается напряжение. ЭДС термопары $\varepsilon_{\text{т}}$ рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{\text{т}} = \frac{\rho l_{\text{х}}}{R_2 L} \varepsilon_{\text{э}}. \quad (7)$$

Полное сопротивление реохорда ρ в этом случае должно быть известно, его значение измерено заранее и написано на корпусе прибора.

Наличие или отсутствие малых токов в схеме в процессе компенсации, а также их направление определяется при помощи высокочувствительного гальванометра. Режим чувствительности должен быть установлен $30 \mu\text{A}$.

3. Техника безопасности по работе с приборами

В работе используются горячие и холодные жидкости и нагревательные элементы, при работе с которыми следует соблюдать осторожность.

Не располагайте рядом с нагревательной плиткой или на ней легко плавящиеся предметы. На плитке допускается нагревать только стеклянную колбу с водой и керамический тигель с оловом. Не касайтесь поверхности плитки и расположенных на ней элементов рукам. Для снятия с плитки и размещения на керамических подставках нагретых предметов предусмотрены щипцы.

Не допускайте попадания нагретых жидкостей на поверхность тела (температура кипения воды — 100 °С, температура плавления олова — 231,85 °С).

При получении термического ожога незамедлительно поместите место ожога под струю проточной холодной воды и обратитесь за помощью к инженеру.

В работе используется сверххолодное вещество — жидкий азот, находящееся при температуре $-195,80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Не опускайте пальцы и посторонние предметы в сосуд с жидким азотом. При попадании на открытые участки кожи капли азота перемещаются по поверхности кожи и испаряются, не причиняя вреда (не нужно это проверять на себе). Если у капель нет возможности перемещаться, например, при попадании в складки кожи или под одежду (в рукав, в носки) в месте контакта немедленно возникает обморожение. В случае такого попадания незамедлительно попытайтесь стряхнуть жидкий азот с кожи, сняв мешающий элемент одежды. В случае получения обморожения участка кожи обратитесь к инженеру за первой медицинской помощью.

4. Порядок выполнения лабораторной работы

4.1 Градуировка термопары

Включите плитку. Поставьте на плитку тигель с оловом и колбу с водой. Пока нагревается плитка, соберите электрическую схему, показанную на рис. 12. Попросите преподавателя или инженера лаборатории проверить схему. Блок питания можно включать только после проверки правильности сборки электрической схемы, установив напряжение 3 В.

При помощи собранной схемы методом компенсации проведите измерение термоэдс, получаемое на термопаре при погружении (контакте) рабочего спая термопары в различные вещества, находящееся в состоянии фазового перехода с известной температурой T (°C):

- температура кипения жидкого азота $T = -195,80 + 0,0109(p - 760)$;
- температура кипения воды $T = 100,000 + 0,0367(p - 760) - 0,000023(p - 760)^2$;
- температура кристаллизации жидкого олова $T = 231,85$ °C.

Обратите внимание на зависимость температуры кипения жидкости от давления p (мм. рт. ст.). Перед выполнением работы рекомендуется записать показания барометра, расположенного в лаборатории.

Опорный спай термопары погружается в тающий лед ($T = 0$ °C). Полярность термопары при включении в схему определите из классической теории термоэдс, считая, что медь богаче электронами, чем константан. При проведении эксперимента для сохранения полярности термоэдс спай, который был погружен в более холодное вещество и в дальнейшем должен погружаться в более холодное вещество, то же самое касается более горячего спая. При смене веществ самостоятельно выбирайте, какой спай будет рабочим, а какой опорным.

Для каждого вещества: установите рабочий ток I , скомпенсируйте $\varepsilon_{\text{э}}$, затем $\varepsilon_{\text{т}}$, затем снова $\varepsilon_{\text{э}}$. Сделайте несколько таких измерений.

1. Поставьте движок реохорда в положение примерно 80–90% его длины, для обеспечения максимальной точности измерений. Рассчитайте величину

рабочего тока исходя из ожидаемого значения термоэдс для известной температуры (Таблица 1) и значения сопротивления реохорда (указано на его основании) с учетом положения движка ($I = \varepsilon_{\text{табл}} / R$).

2. Поставьте переключатель в положение, когда выключены оба плеча схемы. Зная напряжение блока питания (3,00 В), рассчитайте необходимое суммарное сопротивление $R_1 + R_2$ для обеспечения рассчитанного тока в цепи (сопротивлением $R_{\text{реохорда}}$ в формуле (6) для грубого расчета можно пренебречь), установите на каждом из магазинов половинное значение полученной величины.

Расчетный ток не должен превышать наименьшего максимально допустимого тока, указанного на блоках магазинов сопротивлений, иначе они выйдут из строя (сгорят). Включите ключ питания схемы, при этом по показаниям индикатора тока на блоке питания необходимо **проверить, что ток в схеме совпадает с расчетом и не превышает** максимально допустимое значение, указанное на последовательно соединенных элементах схемы. Иначе следует **немедленно отключить ключ** и проверить расчет сопротивления, правильность сборки магазинов и положение их регулировочных ручек.

3. Поставьте переключатель в положение, обеспечивающее компенсацию термоэдс, установите магазины сопротивлений в положение, обеспечивающее рабочий ток потенциометров заведомо несколько больше расчетного (например, уменьшите сопротивление R_1).

Через гальванометр и через нормальный элемент нельзя пропускать большой ток, поэтому установите переменное сопротивление в цепи гальванометра на максимальное значение, кратковременно включите ключ цепи питания и заметьте, в какую сторону отклоняется его стрелка.

Если отклонение стрелки незаметно, постепенно, начиная с младших разрядов, уменьшайте величину защитного сопротивления гальванометра. Цепь включайте на короткое время, достаточно чтобы заметить отклонение.

4. Установите магазин сопротивлений R_1 в положение, обеспечивающее рабочий ток в цепи немного меньший рассчитанного, и включите цепь. Стрелка должна

отклониться в противоположную сторону. Если стрелка гальванометра отклоняется в ту же сторону, что и в предыдущем случае, значит в Вашей схеме что-то не так. Разберитесь в причинах и исправьте положение.

5. Постепенно изменяйте ток, повторяя пункты 3 и 4, уменьшая отклонения от расчетного значения, пока не достигнете почти полной компенсации ЭДС термопары. Не нужно стараться достигнуть особенной точности, т.к. это только настройка схемы. Окончательную балансировку Вы проведете при измерениях движком реохорда. Теперь рабочий ток (для заданной разности температур) у Вас установлен. Запишите получившуюся сумму сопротивлений $R_1 + R_2$.
6. Поставьте переключатель в положение, обеспечивающее компенсацию ЭДС нормального элемента. Установите величину защитного сопротивления гальванометра на максимум. Не изменяя рабочего тока (т.е. не изменяя суммы сопротивлений $R_1 + R_2$), добейтесь компенсации ЭДС нормального элемента, одновременно уменьшая R_1 и увеличивая R_2 на одинаковое количество шагов, или наоборот, добиваясь уменьшения отклонения стрелки гальванометра. По мере компенсации уменьшайте защитное сопротивление R_3 , при этом чувствительность гальванометра будет повышаться, и компенсацию можно будет выполнять точнее при помощи младших разрядов магазина сопротивления.
7. Поставьте переключатель в положение, обеспечивающее компенсацию ЭДС термопары. Снова установите величину защитного сопротивления R_3 гальванометра на максимум. Не изменяя рабочего тока (т.е. не трогая магазины сопротивлений R_1 и R_2), добейтесь компенсации ЭДС термопары, изменяя положение движка реохорда в ту или иную сторону, добиваясь уменьшения отклонения стрелки гальванометра. По мере компенсации уменьшайте защитное сопротивление R_3 , при этом чувствительность гальванометра будет повышаться, и компенсацию можно будет выполнять точнее при помощи младших разрядов магазина сопротивления.

Повторите пункты 6 и 7 несколько раз для более точного нахождения положений компенсации.

При работе с оловом действуйте по схеме, описанной далее. Расплавив олово и погрузив в него спай термопары, следует приблизительно скомпенсировать термоэдс; затем выключить плитку и следить за гальванометром компенсационной схемы, время от времени восстанавливая компенсацию движком реохорда по мере снижения температуры. В момент начала кристаллизации температура перестает понижаться и остается постоянной, пока не закристаллизуется все олово. За это время следует окончательно скомпенсировать схему, и, если показания гальванометра не будут меняться еще в течение некоторого времени, можно считать найденное значение термоэдс относящимся к точке кристаллизации. Это измерение надо повторить несколько раз, вновь расплавляя и кристаллизуя олово.

Если кристаллизация происходит слишком быстро, и Вы не успеваете скомпенсировать схему, следует записывать показание гальванометра в единицах его шкалы при каком-то произвольном, но по возможности близком к точке компенсации при температуре $T = T_{\text{крист}}$ положении движка реохорда, а затем ввести поправку, определив чувствительность гальванометра к малым изменениям измеряемой ЭДС (связь цены деления гальванометра и цены деления реохорда). Для этого задается постоянная температура рабочего спаи термопары, например, 100°C и отсчитываются показания гальванометра при небольших смещениях движка реохорда от точки компенсации.

4.2 Самостоятельное изготовление термопары¹

Для хорошей работы термопары необходимо обеспечить надежный контакт между ее проволочками — концы их должны спаиваться или свариваться. Достаточно хорошее соединение можно получить, разогревая проволочки тер-

¹ Дополнительное задание

мопары с помощью дугового разряда, зажигаемого между ними и крепким водным раствором поваренной соли. Именно этот простой, не требующий специальных приспособлений метод используется в нашей лаборатории.

Получите у инженера куски медной и константовой проволоки длиной 70–75 см и тщательно зачистите их концы. Надев на константовую проволоку полихлорвиниловую изолирующую трубку, соедините скруткой концы проволок. Длина скрученных участков должна быть большой (5–10 см), а сами концы должны плотно прилегать друг к другу (воспользуйтесь плоскогубцами). Соберите схему (рис. 14).

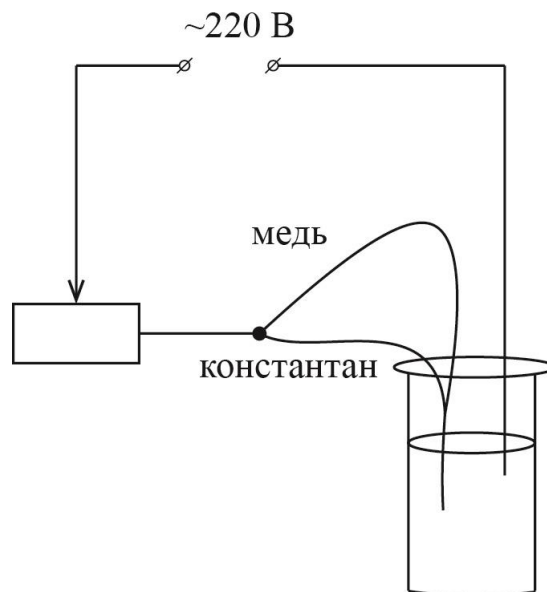


Рис. 14. Схема для сварки термопары.

Наденьте защитные очки. Держа термопару плоскогубцами или щипцами с изолированными ручками (или просто рукой, надев на обе проволоочки изолирующую трубку), коснитесь поверхности раствора скрученными концами проволок. Возникающая дуга расплавляет и сваривает металл. В месте спая должен образоваться шарик диаметром 1–1,5 мм. Так же сваривается второй спай.

Промойте оба спая водопроводной водой, разрежьте медную проволоку в середине и зачистите ее концы. Раскрутите участки проволоки, которые были скручены, так, чтобы спаи оставались единственными контактами между проволоками (осторожно, проволоки при сварке окисляются и становятся очень хрупкими). Установите термопару на штатив.

5. Обработка результатов эксперимента

По известным значениям полной длины реохорда, его сопротивлению на полной длине, значению напряжения эталонного источника и измеренным положениям движка реохорда в момент компенсации термоэдс при известной температуре вычислите значения термоэдс $\varepsilon_{\text{изм}}$ в этих температурных точках (при температуре кипения жидкого азота $T = -195,80 + 0,0109(p - 760)$, температуре кипения воды $T = 100,000 + 0,0367(p - 760) - 0,000023(p - 760)^2$, температуре кристаллизации жидкого олова $T = 231,85^\circ\text{C}$).

1. Вычислите погрешность измерений.
2. По Таблице 1 путем интерполяции определите табличные значения термоэдс $\varepsilon_{\text{табл}}$ для данных температур (3 значения).
3. Таблица содержит лишь усредненные данные для термопар данного типа, вычислите поправки ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{изм}} - \varepsilon_{\text{табл}}$) к табличным значениям для конкретной термопары и постройте график поправок $\Delta\varepsilon(T)$ путем экстраполяции на весь диапазон температур Таблицы 1. Способ экстраполяции выберите самостоятельно. Объясните выбор.
4. Внесите поправки и нанесите на график зависимость $\varepsilon_{\text{терм}}(T) = \varepsilon_{\text{табл}}(T) + \Delta\varepsilon(T)$ и $\varepsilon_{\text{табл}}(T)$, постройте исправленную градуировочную таблицу.
5. Сделайте выводы о ходе работы, принципах работы термопары, соотношения погрешностей с измеряемыми величинами и вычисленными поправками. Предложите способы увеличения точности измерения.

Отчет должен содержать:

1. цель работы, постановку задачи в объеме, выбранном преподавателем;
2. схему установки с термопарой и исследуемыми веществами;
3. электрическую принципиальную схему для метода компенсации;
4. расчетные формулы с указанием единиц измерения и определением для всех буквенных обозначений;

5. формулы для расчета погрешностей;
6. первичные данные, полученные в ходе эксперимента, и значения параметров приборов, необходимые для проведения расчета;
7. расчет величины термоэдс и погрешности измерения;
8. расчет поправок и график поправок;
9. градуировочный график и градуировочную таблицу;
10. выводы по ходу работы, принципам работы с термопарой, сопоставлению точности измерения и полученных результатов и поправок, предложения по улучшению эксперимента и повышению точности измерений.

6. Контрольные вопросы

1. Как устроена термопара? Чем определяется выбор материалов?
2. Каковы причины возникновения термоэдс?
3. В чем заключается методика измерения температуры при помощи термопары?
Каково назначение рабочего и опорного спая?
4. На каком принципе основан метод компенсации?
5. Каким образом можно получить изменяемое напряжение для метода компенсации?
6. Как устроен блок переменного сопротивления? Как из нескольких блоков собрать магазин?
7. Какие отличия потенциометра на основе реохорда и потенциометра, собранного из переменных сопротивлений? В каком случае применяется каждый из них?
8. Как пользоваться потенциометром, собранным из двух магазинов сопротивлений?
9. Как защитить гальванометр от выхода из строя, но при этом в ходе измерений добиваться высокой точности компенсации?
10. Для чего выполняется градуировка термопары?

Список рекомендованной литературы и справочные данные

В.А. Соловьев, В.Е. Яхонтова *Руководство к лабораторным работам по физике*, СПб, 1997г., §5.4.