

12. Градуировка термопары

Лабораторная работа № 52

Термоэлектричество.

В цепи, составленной из двух или больше разнородных металлов или полупроводников, градиенты температур вызывают появление электродвижущих сил. Электродвижущие силы возникают благодаря тепловому движению свободных электронов (или дырок) в месте контактов разнородных проводников, а также в самих проводниках. Это явление получило название *термоэлектричества*, а возникающая э.д.с. называется *термоэлектродвижущей силой* (термоэдс).

Количественная теория термоэлектрических явлений может быть построена только на основе квантовой механики; в рамках классической физики можно наметить только грубо качественную картину, позволяющую наглядно представить причины возникновения термоэдс, но не дающую согласия с опытом часто даже по порядку величины.

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, соответственно, $-eU_A$ и $-eU_B$, 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 контактными слоями; концентрация таких электронов и, следовательно, число электронов, пересекающих границу раздела в единицу времени, по закону Максвелла-Больцмана, пропорциональна $n_A e^{-(W+eU_A)/kT}$, (k – постоянная Больцмана, T – температура). Аналогично поток электронов из В в А пропорционален $n_B e^{-(W+eU_B)/kT}$. Условие равенства потоков дает

$$n_A e^{-(W+eU_A)/kT} = n_B e^{-(W+eU_B)/kT}$$

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 э.д.с. в цепи равна нулю¹. Если же температуры контактов T_1 и T_2 неодинаковы, то в цепи возникает э.д.с.

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

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

Вторая составляющая термоэдс связана с наличием градиента температуры в каждом из проводников А и В. Давление электронного газа в каждой точке проводника, например А, равно $p = n_A k T$, и градиент температуры 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

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

На каждый электрон действует, таким образом, "сторонняя" (не электрическая) сила $f_A = dF_A / n_A S dx = -k \frac{dT}{dx}$. Такая же сила могла бы быть создана электростатическим полем напряженности

$$E_{\text{стор}} = \frac{f_A}{-e} = \frac{k}{e} \frac{dT}{dx}$$

Это так называемая **напряженность сторонних сил**. Отнесенная к единице заряда работа сторонних сил по перемещению электронов вдоль всего проводника А называется **электродвижущей силой**, действующей в этом проводнике

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

(x_1 и x_2 – координаты концов проводника). Аналогично в проводнике В

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

(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 э.д.с. в цепи

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

Согласно (2) и (3) $\varepsilon_A + \varepsilon_B = 0$, так что полная э.д.с. выражается формулой (1).

¹ Этот результат не зависит от конкретной формулы для $U_A - U_B$, а является следствием второго начала термодинамики: если бы в цепи из проводников первого рода (не испытывающих химических изменений при прохождении тока) все части которой имеют одинаковую температуру, существовала отличная от нуля э.д.с., эта цепь была бы вечным двигателем второго рода.

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 ($\varepsilon_{\text{конт}} > 0$ когда $n_A > n_B$), но преувеличивает порядок величины. Кроме того, в классической теории $\varepsilon_{\text{конт}}$ пропорционально разности температур $T_1 - T_2$, а в квантовой коэффициент пропорциональности сам пропорционален температуре $T_{\text{ср}} = \frac{T_1 + T_2}{2}$. 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 $d\varepsilon/dT_1$ убывает с ростом T_1 и даже меняет знак (так называемая *инверсия*).

Термопара.

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 милливольтами на градус. Такие э.д.с. 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 мало инерционны и позволяют следить за сравнительно быстрыми изменениями температуры. Для полупроводников, к которым можно приближенно применять формулу (1), достижимы э.д.с. порядка милливольт на градус, и полупроводниковые термоэлементы находят применение как источники электроэнергии для маломощных установок.

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°C) применяются не очень чувствительные, но высокостабильные термопары из платины и сплава платины с родием. Большой термоэдс и хорошей стойкостью к высоким температурам (до 1400°C) обладают термопары хромель-алюмель (сплавы никеля с хромом и алюминия). При более низких температурах (до 400°C) хорошо работает термопара медь-константан (60% Cu, 40% Ni), особенно удобная тем, что она изготавливается из хорошо распространенных электротехнических материалов.

Термоэдс сильно зависит от состава проводников, а также от деталей кристаллической структуры, в частности – от наличия механических напряжений. Следовательно термопары требуют индивидуальной градуировки. Для облегчения градуировки пользуются справочными таблицами, составленными по усредненным данным для большого числа термопар данного типа. При наличии такой таблицы градуировка термопары сводится к определению индивидуальных поправок к ним при нескольких температурах. Поправки $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{измер}} - \varepsilon_{\text{табл}}$ достаточно малы, а график $\Delta\varepsilon = f(\varepsilon_{\text{измер}})$ 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 $\varepsilon_{\text{измер}}$.

В данной работе предлагается:

1. Изготовить термопару медь-константан;
2. Измерить э.д.с. термопары в нескольких постоянных температурных точках;
3. Определить поправки к справочной таблице и построить график поправок и исправленную градуировочную таблицу. Справочная таблица (для термопары медь-константан) приведена в конце описания.

Изготовление термопары.

Для хорошей работы термопары необходимо обеспечить надежный контакт между ее проволочками – концы их должны спаиваться или свариваться. Достаточно хорошее соединение можно получить разогревая проволочки термопары с помощью дугового разряда, зажигаемого между ними и крепким водным раствором поваренной соли. Именно этот простой, не

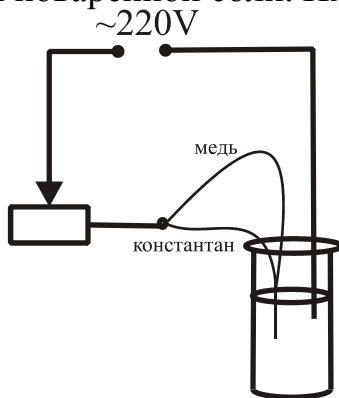


Рис.1

требующий специальных приспособлений метод используется в нашей лаборатории.

Получите у лаборанта куски медной и константановой проволоки длиной 70-75см и тщательно зачистите их концы. Надев на константановую проволоку полихлорвиниловую изолирующую трубку, соедините скруткой концы проволок. Длина скученных участков должна быть большой (5-10см), а самые концы должны плотно прилегать друг к другу (воспользуйтесь плоскогубцами). Соберите схему, показанную на рис.1. 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 1-1,5мм. Таким же образом 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). Аккуратно изогнув термопару, закрепите ее в держателе как показано на рис.2 и подключите медные концы к укрепленным на нем клеммам.

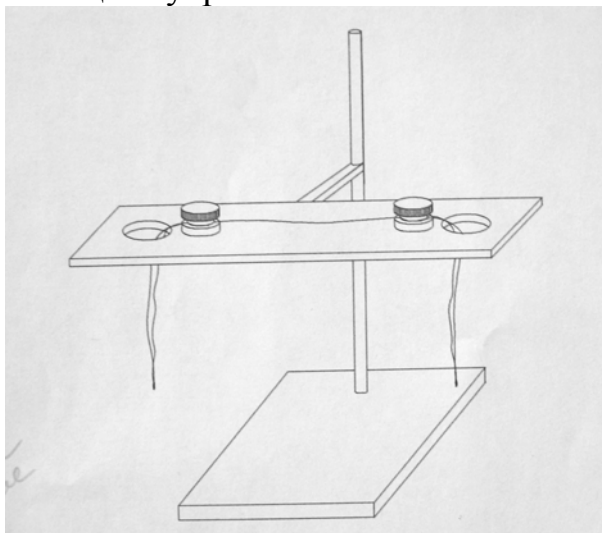


Рис.2

Градуировка термопары.

Один из спаев термопары, называемый **опорным**, следует поддерживать при температуре 0°C , погружая его в тающий снег или толченый лед. Температуру второго, рабочего спая задают, используя так называемые **постоянные температурные точки** - фазовые переходы с хорошо известной температурой.

В данной работе используются следующие точки.

1. Температура кипения жидкого азота $T = -195,80 + 0,0109(p - 760)$
 T - температура в $^{\circ}\text{C}$, p - давление в мм ртутного столба.
 2. Температура кипения воды $T = 100,000 + 0,0367(p - 760) - 0,000023(p - 760)^2$.
 3. Температура кристаллизации жидкого олова $T = 231,85$
- Четвертой точкой является температура опорного спая (0°C).

Снег для опорного спая следует насыпать в стеклянный стаканчик, который

вставляется для теплоизоляции в пенопластовую чашку, и пропитать небольшим количеством воды. При отсутствии снега используется лед (приготавливается в холодильнике), который следует мелко натолочь.

Жидкий азот из большого металлического сосуда Дьюара наливается в дьюаровский стакан. 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 колбочке; спай термопары помещается в парах кипящей воды вблизи от ее поверхности.

Олово расплавляется в фарфоровом тигельке на электроплитке.

Измерение э.д.с. методом компенсации.

Для измерения э.д.с. термопары используется метод компенсации, краткое описание которого приведено ниже. Более подробно читайте в книге: В.А. Соловьев, В.Е.Яхонтова «Руководство к лабораторным работам по физике» СПб, 1997г., §5.4.

Компенсационными называют нулевые (или дифференциальные) методы измерения электрических величин, когда с помощью индикаторного прибора устанавливается равенство потенциалов, создаваемых двумя независимыми источниками э.д.с. В большинстве компенсационных методов используется принцип делителя напряжения, или потенциометра. Потенциометр дает возможность получать регулируемое напряжение U , его величину можно рассчитать, зная сопротивление участка цепи r , с которого снимается напряжение, и протекающий по нему ток I . Это напряжение сравнивается с измеряемой разностью потенциалов U_x в компенсационной схеме, показанной на рис 3. В этой цепи через индикатор (гальванометр) будет течь ток, зависящий от разности $U - U_x$ и от полного сопротивления измерительной цепи

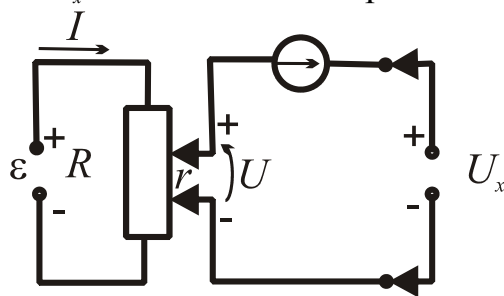


Рис.3

$R_{изм}$. Значение $R_{изм}$ складывается из сопротивления гальванометра, эквивалентного выходного сопротивления потенциометра и выходного сопротивления устройства, создающего напряжение U_x . Изменяя сопротивление участка r , можно добиться равенства напряжений U и U_x . В этом случае ток через гальванометр не будет проходить. Отсутствие тока в гальванометре означает, что подключение напряжения U_x к потенциометру не изменяет никаких токов и напряжений в соединительных цепях: значения U и

U_x будут такими же, как если бы эти цепи были разъединены. Таким образом, в момент компенсации $U_x = U = Ir$.

Потенциометр эквивалентен вольтметру с очень высоким сопротивлением (порядка $U_x / i_{\text{нор}}$, где $i_{\text{нор}}$ – пороговая чувствительность гальванометра).

Точность измерения напряжения с помощью потенциометра зависит от пороговой чувствительности схемы $i_{\text{нор}} R_{\text{изм}}$ и от точности, с которой могут быть определены рабочий ток потенциометра I и сопротивление r . Наивысшей точности можно добиться, используя для калибровки потенциометра электродвижущую силу эталонного источника тока \mathcal{E}_3 . Включая эталонный источник вместо измеряемого напряжения U_x и добиваясь компенсации, находим $I = \mathcal{E}_3 / r_3$, где r_3 – значение сопротивления r при компенсации э.д.с. нормального элемента. Теперь любое напряжение рассчитывают по формуле

$$U_x = \mathcal{E}_3 r_x / r_3, \quad (5)$$

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

В качестве эталонного источника используется **нормальный элемент** – специально изготовленный гальванический элемент Вестона. Электродвижущая сила такого элемента при постоянной температуре устойчива и определена с высокой степенью точности, а при изменении температуры меняется очень мало. Значения э.д.с. нормальных элементов (около 1.0186 В при 20°C) несколько различаются от экземпляра к экземпляру и при повышении температуры на 1°C уменьшается менее чем на 0.0001 В. Значение э.д.с. для данного конкретного прибора указывается в его паспорте. Внутреннее сопротивление нормального элемента порядка 1000 Ом.

Рабочая схема.

Простой и удобный потенциометр можно построить на основе **реохорда** – 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. Если реохордный потенциометр используется для сравнения двух напряжений одного порядка величины, то абсолютных значений сопротивления можно не определять: сопротивления r_3 и r_x заменяются пропорциональными им длинами, отсчитанными по шкале реохорда. Однако в нашем случае $U_x \ll \mathcal{E}_3$, длины оказываются очень разными, что делает такие измерения невозможными. Поэтому потенциометр составляют из включенных последовательно двух магазинов сопротивлений R_1 и R_2 и реохорда АВ, как показано на рис. 4. Напряжение нормального элемента компенсируют на сопротивлении R_2 , а термоэдс – на части АС реохорда. Магазин сопротивлений R_1 требуется для того, чтобы можно было устанавливать нужную величину рабочего тока и при компенсации сохранять

этот ток неизменным. В формуле (5) нужно теперь считать $r_3 = R_2$, а $r_x = \rho \frac{l_x}{L}$, где ρ – сопротивление реохорда, L – полная длина проволоки, l_x – длина её отрезка, с которого снимается напряжение. Э.д.с. термопары \mathcal{E}_T рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E}_T = \mathcal{E}_3 \frac{\rho l_x}{R_2 L}. \quad (6)$$

Полное сопротивление реохорда в этом случае должно быть известно.

В измерительную цепь включается защитное сопротивление R_3 , предохраняющее гальванометр от перегрузки.

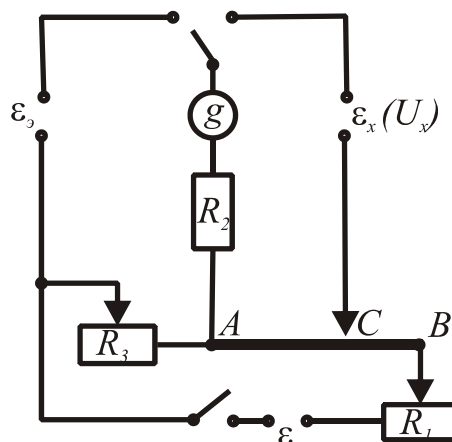


Рис. 4

Порядок работы.

Включите плитку. Поставьте на плитку тигель с оловом и колбу с водой. Пока нагревается плитка, изготовьте термопару. Соберите электрическую схему, показанную на рис.4. Полярность термопары при включении в схему определяйте из классической теории термоэдс, считая, что медь богаче электронами, чем константан.

Для каждой рабочей точки: установите рабочий ток, скомпенсируйте \mathcal{E}_3 , затем \mathcal{E}_x и снова \mathcal{E}_3 . Сделайте несколько таких измерений.

Рабочий ток, следует подбирать такой, который обеспечивает максимальную точность (компенсация почти на полной длине реохорда).

Рационально подбирать рабочий ток следующим образом.

1. Рассчитайте величину рабочего тока исходя из ожидаемого значения э.д.с. и приближенного значения сопротивления реохорда (указано на его основании).
2. Поставьте переключатель в положение, обеспечивающее компенсацию термоэдс. Поставьте движок реохорда в положение, при котором вы хотите получить компенсацию.
3. С помощью магазинов R_1 и R_2 установите рабочий ток заведомо бóльший, чем рассчитанный, включите гальванометр и заметьте, в какую сторону отклоняется его стрелка.

Внимание! Через гальванометр и через нормальный элемент нельзя пропускать большой ток. Поэтому обязательно включите защитное сопротивление. Гальванометр включайте на короткое время, достаточно чтобы заметить наличие отклонения. Только если отклонение стрелки гальванометра очень мало можно уменьшить величину защитного сопротивления (при выключенном гальванометре!). Однако при следующих измерениях не забудьте опять включить защитное сопротивление.

4. Установите рабочий ток заведомо меньший рассчитанного и включите гальванометр. Если стрелка гальванометра отклоняется в ту же сторону, что и в предыдущем случае, значит в вашей схеме что-то не так. Причин может быть несколько. Например, пределы тока выбраны неверно; неправильно определена полярность термоэдс; неправильно собрана схема. Разберитесь в причинах и исправьте положение.
5. После того, как вы правильно определили пределы изменения рабочего тока постепенно изменяйте ток (повторяя п.п. 3 и 4), пока не достигнете почти полной компенсации э.д.с. термопары. Здесь не нужно стараться достигнуть особой точности, т.к. это только настройка схемы. Окончательную балансировку вы проведете потом, при измерениях, движком реохорда.
6. Теперь рабочий ток (для заданной разности температур) у вас установлен. Запишите получившуюся сумму сопротивлений $R_1 + R_2$. Поставьте переключатель в положение, обеспечивающее компенсацию э.д.с. нормального элемента. Не изменяя рабочего тока (т.е. не изменяя суммы сопротивлений $R_1 + R_2$) добейтесь компенсации э.д.с. нормального элемента действуя аналогично тому как сказано в п.п. 3 и 4, только здесь нужно менять не рабочий ток, а падение напряжения на сопротивлении R_2 изменяя отношение сопротивлений R_1/R_2 . После этого можете приступать к измерениям.

При работе с оловом действуйте так. 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 при каком-то произвольном, но по возможности близком к точке компенсации при температуре $T = T_{крисст}$ положении движка реохорда, а затем ввести поправку, определив чувствительность гальванометра

к малым изменениям измеряемой эдс. (Для этого задается постоянная температура рабочего спая термопары, например, 100°C, и отсчитываются показания гальванометра при небольших смещениях движка реохорда от точки компенсации).

Обработка результатов.

По измеренным значениям термоэдс $\varepsilon_{измер}$ и известным температурам вычислите поправки $\Delta\varepsilon$ к табличным значениям, которые находятся интерполяцией по справочной таблице. Постройте график зависимости $\Delta\varepsilon$ от $\varepsilon_{измер}$. Определите поправки в равноотстоящих точках (через 500мкв), вычислите соответствующие значения $\varepsilon_{табл}$ и T (интерполяцией по справочной таблице). Постройте исправленную таблицу и график поправок.

Определение сопротивления реохорда.

Данное на реохорде значение сопротивления может служить только для ориентировки – оно найдено слишком грубо для точных вычислений. Существенно также, что в него включается сопротивление контакта на начальном конце реохорда, которое не остается постоянным. Поэтому точное значение сопротивления реохорда должно быть найдено непосредственно во время работы. Для этой цели используется мост постоянного тока. Описание прибора выдается в лаборатории.

Определите коэффициенты в уравнении $r_x = a + bl_x$ (l_x – длина рабочей части реохорда) и в дальнейшем пользуйтесь значениями, рассчитанными по этой формуле. Для определения коэффициентов a и b можно ограничиться двумя измерениями r_1 и r_2 при $l \approx 0$ и $l \approx 1000\text{мм}$ и найти коэффициенты расчетом по формуле $a = (r_2 l_2 - r_1 l_1) / (l_2 - l_1)$; $b = (r_2 - r_1) / (l_2 - l_1)$.

СПРАВОЧНАЯ ТАБЛИЦА

эдс термопары медь-константан (мв), опорный спай при $T_2 = 0^\circ\text{C}$,

T_1 – температура рабочего спая

$T_1, ^\circ\text{C}$	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	-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	6.20	6.70	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									