

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №55

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОПАРЫ

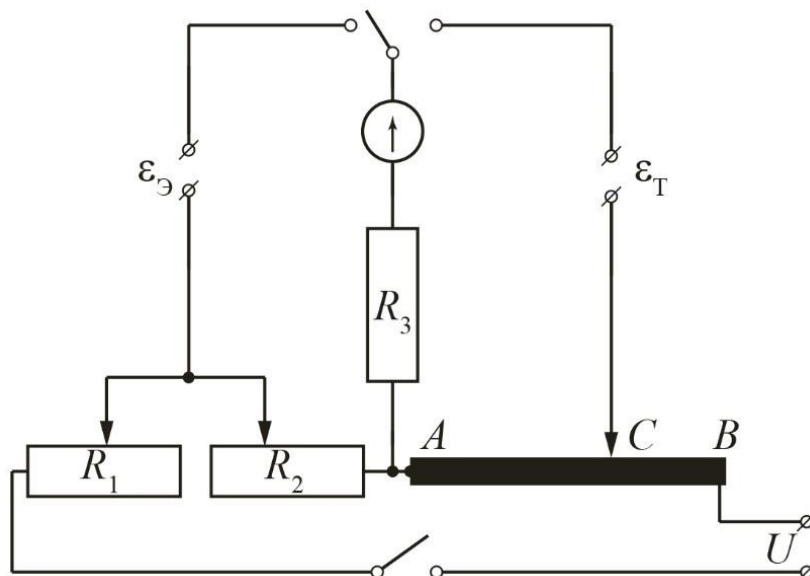
Поляков Даниил, Б23-ФЗ

Цель работы: проградуировать термопару из меди и константана, экспериментально определив протекающую по ней ЭДС при погружении термопары в воду со льдом, кипящую воду, расплавленное олово и жидкий азот, используя метод компенсации.

Оборудование:

- Термопара медь-константан;
- Штатив;
- Калориметр для воды со льдом;
- Сосуд для кипячения воды;
- Сосуд Дьюара для жидкого азота;
- Тигель для плавления олова;
- Нагревательная электроплитка;
- Керамические подставки;
- Блок питания;
- Реохорд длиной 1 м и полным сопротивлением 2.8 Ом;
- Магазины сопротивлений;
- Ключ для замыкания цепи;
- Ключ для переключения «плеча» схемы;
- Гальванометр;
- Нормальный элемент с ЭДС 1.01795 В;
- Соединительные провода.

Принципиальная схема используемой цепи



Расчётные формулы

- Полное сопротивление реостата (в состоянии скомпенсированной силы тока через гальванометр):

$$R_1 + R_2 = \rho \frac{l_x}{L} \frac{U}{\varepsilon_m}$$

U – ЭДС блока питания;

ε – ЭДС термопары;

ρ – полное сопротивление реохорда;

l_x – длина отрезка АС реохорда;

L – полная длина реохорда.

- Сопротивление второго плеча реостата (в состоянии скомпенсированной силы тока через гальванометр):

$$R_2 = (R_1 + R_2 + \rho) \frac{\varepsilon}{U}$$

U – ЭДС блока питания;

ε – ЭДС термопары;

$R_2 + R_2$ – полное сопротивление реостата;

ρ – полное сопротивление реохорда.

- ЭДС термопары (в состоянии скомпенсированной силы тока через гальванометр):

$$\varepsilon = \frac{\rho l_x}{R_2 L} \varepsilon_3$$

ε_3 – ЭДС эталонного источника тока;

ρ – полное сопротивление реохорда;

l_x – длина отрезка АС реохорда;

L – полная длина реохорда;

R_2 – сопротивление второго плеча реостата.

- Температура кипения воды (°C):

$$T = 100.000 + 0.0367(p - 760) - 0.000023(p - 760)^2$$

p – атмосферное давление в комнате (мм рт ст).

- Температура кипения жидкого азота (°C):

$$T = -195.80 + 0.0109(p - 760)$$

p – атмосферное давление в комнате (мм рт ст).

- Разница между экспериментально полученной ЭДС термопары и табличным значением:

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_{табл}$$

ε – ЭДС термопары;

$\varepsilon_{табл}$ – табличная ЭДС термопары.

Порядок измерений

1. Соберём цепь по схеме. Налъём в калориметр воды со льдом - таким образом его содержимое будет находиться при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В процессе работы будем добавлять лёд в калориметр по мере его таяния, чтобы поддерживать температуру в сосуде постоянной. Погрузим в этот сосуд опорный спай термопары. В другом сосуде вскипятим воду на электроплитке и погрузим в него рабочий спай термопары. При этом в процессе измерения не будем снимать сосуд с плитки, чтобы вода в нём находилась в состоянии кипения и её температура оставалась постоянной. Также установим олово в тигле на плитку, чтобы оно плавилось, пока мы проводим измерения с водой. Включим блок питания и установим его ЭДС равным 3.0 В и не будем изменять её в течение всего эксперимента. Пока ключ оставим разомкнутым.
2. Теперь нужно выбрать начальные сопротивления R_1 и R_2 реостата, составленного из двух магазинов сопротивлений. В соответствии с формулой для R_1+R_2 (см. **Расчётные формулы**), в состоянии, когда сила тока через гальванометр скомпенсирована, R_1+R_2 не может быть больше $\rho \frac{U}{\varepsilon_m}$. Полное сопротивление реохорда ρ указано на его корпусе. ЭДС термопары ε можем оценить по таблице усреднённых значений ЭДС для исследуемой термопары в зависимости от разницы температур на его спаях (см. **Приложение**), так как мы знаем температуры на спаях. Тогда рассчитаем примерное максимальное сопротивление R_1+R_2 . Округлим результат в меньшую сторону, чтобы соответствующий ему l_x лежал в диапазоне $0.7 - 0.9\text{ м}$, так как сопротивление R_1+R_2 должно быть достаточно большим, чтобы проходящий через сопротивления ток был для них безопасным. Теперь по следующей формуле оценим сопротивление R_2 , при котором сила тока будет скомпенсирована. Выставим полученные оценочные значения R_1 и R_2 на магазинах сопротивлений.
3. Выставим максимальное сопротивление R_3 гальванометра и замкнём ключ для подачи тока из блока питания в цепь. Сначала скомпенсируем нормальный элемент. Замкнём ключ-переключатель для включения участка с нормальным элементом в цепь. Стрелка гальванометра отклонится. Будем перераспределять сопротивление между R_1 и R_2 , не изменяя при этом их суммы, до тех пор, пока стрелка гальванометра не приблизится к 0. Тогда понизим сопротивление R_3 , чтобы отклонение стрелки стало максимальным, но не выходило за пределы шкалы, чтобы не повредить гальванометр. Снова перераспределим сопротивления R_1 и R_2 . Будем понижать сопротивление R_3 до нуля и корректировать значения сопротивлений. Таким образом получим наиболее точные значения R_1 и R_2 .

4. Снова установим сопротивление R_3 максимальным и переключим ключ для подключения участка с термопарой в цепь, чтобы скомпенсировать термопару. Стрелка гальванометра отклонится. Перемещая движок реохорда будем приближать стрелку гальванометра к 0, постепенно понижая сопротивление R_3 . Когда сопротивление R_3 станет равным нулю и не будет заметно отклонение стрелки, снимем положение движка реохорда l_x . По полученным значениям l_x и R_2 можно рассчитать ЭДС термопары ε .
5. Разомкнём ключ и уберём сосуд с кипящей водой в сторону. Снимем тигель с расплавленным оловом с плитки и подождём, пока оно начнёт кристаллизироваться – так мы будем знать температуру олова в момент измерения, которая равна его температуре плавления. Пока олово остывает, рассчитаем и выставим сопротивления R_1 и R_2 как описано в пункте 2. После этого погрузим рабочий спай термопары в олово и повторим действия, описанные в пунктах 3–4.
6. Разомкнём ключ и достанем спаи термопары из сосудов. Налъём жидкого азота в сосуд Дьюара и погрузим в него опорный спай, а рабочий спай погрузим в калориметр с водой и льдом – так полярность ЭДС термопары останется прежней. Повторим измерения, описанные в пунктах 2–4.
7. Снимем показания барометра атмосферного давления в лаборатории p .

Таблицы и обработка данных

- Атмосферное давление в лаборатории $p = 775 \text{ мм рт ст}$;
- ЭДС нормального элемента $\varepsilon_3 = 1.01795 \text{ В}$;
- Полная длина реохорда $L = 1 \text{ м}$;
- Полное сопротивление реохорда $\rho = 2.8 \text{ Ом}$;
- Установленная ЭДС блока питания $U = 3.0 \text{ В}$.

Значения температур кипения воды и жидкого азота вычислим по приближенным формулам их зависимости от давления (см. **Расчётные формулы**), а зависимостью температуры плавления воды и олова от давления пренебрежём.

Табличные значения ЭДС термопары $\varepsilon_{\text{табл}}$, соответствующие нашим температурам T_1 и T_2 , получим интерполяцией таблицы (см. **Приложение**) полиномом 3-ей степени по методу наименьших квадратов.

Таблица 1. Результаты исследования зависимости ЭДС термопары от температуры на его спаях

Опорный спай	$T_1, ^\circ\text{C}$	Рабочий спай	$T_2, ^\circ\text{C}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$l_x, \text{мм}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$\varepsilon_{\text{табл}}, \text{мВ}$	$\Delta\varepsilon, \text{мВ}$
Вода со льдом	0	Кипящая вода	100.54	995.0	505.0	791	4.46	4.29	0.17
Вода со льдом	0	Олово при температуре плавления	231.85	464.4	235.6	713	8.63	11.01	-2.39
Жидкий азот	-195.64	Вода со льдом	0	663.2	336.8	708	-5.99*	-5.49	-0.50

* Здесь ЭДС термопары записана с минусом, чтобы знак соответствовал табличному. Мы бы получили это ЭДС, если бы поменяли спаи местами.

Отклонение ЭДС термопары от табличного $\Delta\varepsilon$ получилось очень большим в случае с оловом. Скорее всего это связано с тем, что измерения не были проведены достаточно быстро, и олово успело пересечь точку кристаллизации и остыть. При интерполировании зависимости $\Delta\varepsilon(T)$ придётся отбросить эту точку. При этом для интерполяции можно добавить одну точку: при отсутствии разности температур между спаями, т.е. при температуре рабочего спая 0°C , ЭДС термопары должно быть равно 0 ($\Delta\varepsilon$, соответственно, тоже равно 0). Получится три точки, которые интерполируем полиномом 2-ой степени.

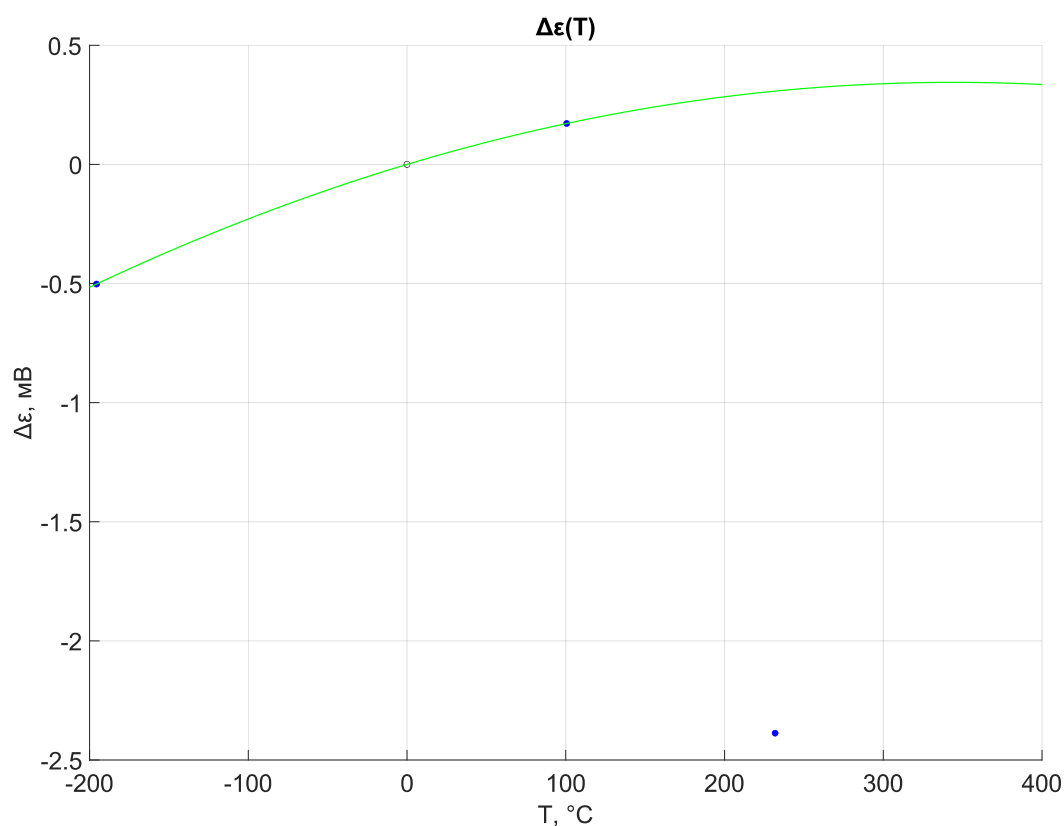


График 1. Зависимость поправки к табличным значениям ЭДС термопары от температуры рабочего спая при температуре опорного спая 0°C и результат интерполяции

Используя полученные значения поправки, построим градуировочную таблицу для исследованной термопары.

Таблица 2. Экспериментальная зависимость ЭДС термопары медь–константан от температуры рабочего спая при температуре опорного спая 0 °С

$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$
-200	-6.06	0	0.00	210	10.11
-190	-5.86	10	0.41	220	10.66
-180	-5.65	20	0.83	230	11.22
-170	-5.44	30	1.25	240	11.77
-160	-5.21	40	1.69	250	12.33
-150	-4.97	50	2.12	260	12.90
-140	-4.72	60	2.58	270	13.47
-130	-4.45	70	3.04	280	14.04
-120	-4.17	80	3.50	290	14.62
-110	-3.88	90	3.97	300	15.20
-100	-3.58	100	4.45	310	15.78
-90	-3.26	110	4.93	320	16.37
-80	-2.95	120	5.43	330	16.96
-70	-2.61	130	5.92	340	17.56
-60	-2.27	140	6.42	350	18.16
-50	-1.92	150	6.93	360	18.76
-40	-1.55	160	7.46	370	19.37
-30	-1.17	170	7.98	380	19.98
-20	-0.79	180	8.50	390	20.59
-10	-0.40	190	9.04	400	21.21
—	—	200	9.57	—	—

Изобразим полученную зависимость графически.

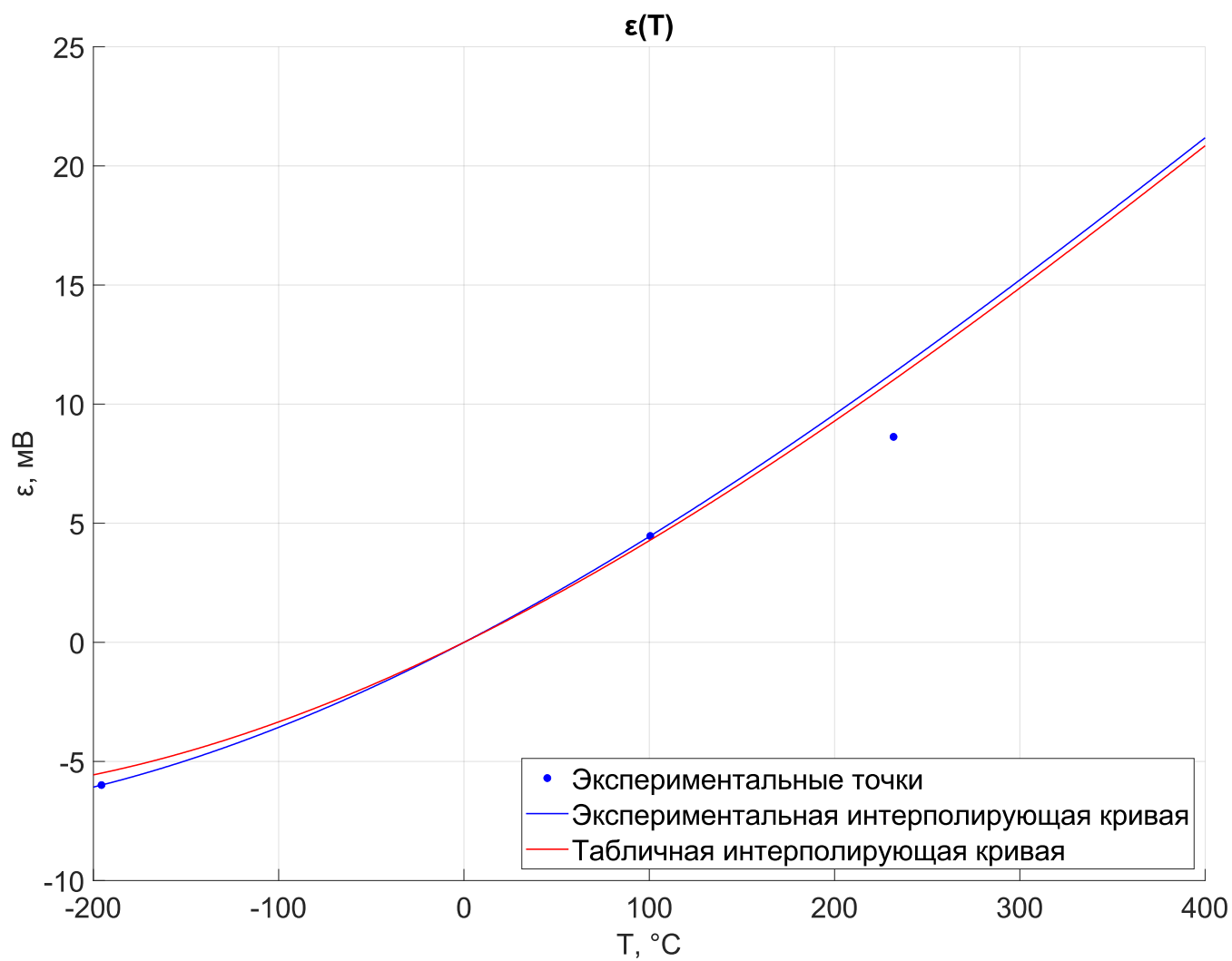


График 2. Экспериментальная и табличная зависимости ЭДС термопары медь–константан от температуры рабочего спая при температуре опорного спая $0\text{ }^\circ\text{C}$

Выводы

- В результате работы была проведена градуировка термопары медь-константан (график 2);
- Возникающая в термопаре ЭДС однозначно связана с парой температур на её спаях, что позволяет использовать термопару в качестве высокоточного прибора для измерения температуры;
- Зависимость ЭДС термопары от температуры на её спаях зависит не только от материалов, из которых она изготовлена, поэтому перед использованием термопары в качестве измерительного прибора следует провести её градуировку;
- Метод компенсации с нормальным элементом можно использовать в некоторых ситуациях, когда необходима высокая точность измерений ЭДС;
- Точность градуировки можно было улучшить, в первую очередь, проведя большее количество измерений для каждой точки и используя больше температурных точек. Также имеет значение точность приборов, использованных в электрической цепи.

Приложение

Таблица 3. Зависимость ЭДС термопары медь–константан от температуры рабочего спая при температуре опорного спая 0 °C (усреднённые данные)

$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$
-200	-5.54	0	0.00	210	9.82
-190	-5.38	10	0.39	220	10.36
-180	-5.20	20	0.79	230	10.91
-170	-5.02	30	1.19	240	11.46
-160	-4.82	40	1.61	250	12.01
-150	-4.60	50	2.03	260	12.58
-140	-4.38	60	2.47	270	13.14
-130	-4.14	70	2.91	280	13.71
-120	-3.89	80	3.36	290	14.28
-110	-3.62	90	3.81	300	14.86
-100	-3.35	100	4.28	310	15.44
-90	-3.06	110	4.75	320	16.03
-80	-2.77	120	5.23	330	16.62
-70	-2.46	130	5.71	340	17.22
-60	-2.14	140	6.20	350	17.82
-50	-1.81	150	6.70	360	18.42
-40	-1.47	160	7.21	370	19.03
-30	-1.11	170	7.72	380	19.64
-20	-0.75	180	8.23	390	20.25
-10	-0.38	190	8.76	400	20.87
–	–	200	9.29	–	–