

Работа 11.8 Экспериментальная проверка закона Видемана-Франца. Инструкции по выполнению работы.

Оглавление

Цель работы.....	1
Меры безопасности.....	1
Принцип измерения.....	2
Экспериментальная ячейка.....	3
Используемое оборудование.....	6
Вольтметр В7-78/1.....	7
Источник тока INSTEK GPR30H10D.....	8
Вольтметр В7-38.....	8
Термопары.....	8
Выполнение измерений.....	9
Контрольные вопросы.....	10
Приложение.....	11
Оценка времени установления теплового равновесия в образце.....	11
Табличные данные для постоянной Лоренца, удельного сопротивления и коэффициента теплопроводности используемых материалов.....	11

Цель работы

Целью работы является экспериментальное определение величины постоянной Лоренца $L = \frac{\kappa}{\sigma T}$ (здесь κ – коэффициент теплопроводности, σ – проводимость, а T — абсолютная температура) при комнатной температуре для нескольких распространенных металлов и сплавов: меди, латуни, алюминия, дюралюминия.¹

Меры безопасности

В работе используются подключаемые к сети 220В приборы, их использование требует стандартных мер безопасности.

Используемые источники напряжения могут выдавать напряжение до 300В, перед включением или выключением источника, при отключении или подключении экспериментальной ячейки к источнику необходимо выводить до нуля выдаваемое им напряжение.

При подключенной исправной ячейке источники работают в режиме стабилизации по току и не выдают напряжение больше 10В. **При обнаружении большего напряжения на индикаторе источника необходимо приостановить выполнение работы и обратиться к преподавателю или лаборанту!**

В ходе эксперимента ячейка нагревается на 15-20 °С выше комнатной температуры. Эта температура не представляет дополнительной опасности.

¹ Тестовый вариант работы был выполнен в 2015 году в качестве вопроса по выбору по курсу общей физики VI семестра студентами 222 группы Л.Гинзбургом и А.Орловым под руководством В.Н.Глазкова.

Принцип измерения

В постоянную Лоренца входят удельные характеристики материала: проводимость и теплопроводность. Их вычисление требует точного учёта геометрии образца, что является источником дополнительной погрешности. Необходимо отметить, что прецизионное измерение проводимости (сопротивления) и теплопроводности, вообще говоря, требуют разной геометрии эксперимента. Для измерения сопротивления предпочтительно иметь длинный однородный проводник с заметным сопротивлением. При измерении теплопроводности важно избежать неконтролируемых потерь тепла, для чего предпочтителен образец с минимальной площадью боковых стенок. В то же время, во многих случаях в реальном эксперименте желательно проводить измерения разных величин на одном и том же образце.

Используемая в этой работе схема измерения моделирует этот подход (измерение разных физических величин, входящих в конечный ответ, на одном образце), а также позволяет исключить влияние геометрии образца за счёт выбора геометрии эксперимента.

Исследуемыми образцами являются металлические стержни диаметром 3.5-5 мм и длиной около 50 мм, изготовленные из различных распространённых металлов и сплавов: меди, латуни (сплава меди и цинка с незначительным добавлением других добавок, типичное содержание меди 60-80%), алюминия и дюралюминия (сплав, содержащий 94% Al, 4% Cu, 1%Mg и другие добавки). На образце выбираются две измерительные точки, между которыми измеряются и электрические, и тепловые свойства: и падение напряжения при измерении сопротивления, и разность температур при измерении теплопроводности. Таким образом, сопротивление и теплопроводность измеряются *на одном и том же* фрагменте стержня (с точностью до погрешности монтажа потенциометрического контакта и спая термопары).

Полное сопротивление цилиндрического фрагмента между измерительными точками

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S}, \text{ где } l \text{ — длина фрагмента, а } S \text{ — площадь сечения. Сопротивление}$$

измеряется по стандартной четырёхконтактной схеме: через образец пропускается известный ток через токоподводящие контакты на концах образца и измеряется падение напряжения между измерительными точками. Так как в цепи идеального вольтметра ток не течёт, такая схема позволяет полностью исключить сопротивления контактов, важные, например, для покрытых оксидной плёнкой алюминиевых образцов.

Перепад температур ΔT между измерительными точками в отсутствие потерь на боковых стенках при выделении мощности P на одном из концов стержня задаётся уравнением

$$\frac{P}{S} = \kappa \frac{\Delta T}{l}. \text{ Для исключения потерь тепла при измерении теплопроводности образец}$$

окружается коаксиальным экраном, на котором поддерживается тот же градиент температур, что и на образце. При этом, пренебрегая конвекцией, радиального потока тепла от образца к экрану нет.

Тогда для числа Лоренца получаем:

$$L = \frac{\kappa}{\sigma T} = \frac{P R}{\Delta T} \times \frac{1}{T}, \text{ то есть геометрия образца в ответ явно не входит, а входят только}$$

реально измеряемые величины: сопротивление, выделяемая на нагревателе мощность, перепад температур.

Таким образом, используемый метод измерения позволяет не учитывать размеры образца при определении постоянной Лоренца, позволяет провести все измерения разных физических величин на одном и том же образце, а также позволяет уменьшить потери тепла без использования серьёзной теплоизоляции. Похожие подходы часто используются и в реальных экспериментах.

Экспериментальная ячейка

Эскиз экспериментальной ячейки и схема электрических цепей ячейки показаны на рисунке 1. Фотография одной из ячеек показана на рисунке 2.

В различных экспериментальных ячейках установлены образцы из разных металлов. Ячейки маркированы цифрами на наклейке на основании и выбитыми цифрами на верхней крышке экрана и боковой стороне основания. Соответствие номера ячейки материалу образца приведено в таблице 1.

Основание ячейки установлено на радиаторе, так что его температура поддерживается примерно равной комнатной. В основание крепится образец: стержень из одного из металлов, существенные геометрические параметры образцов приведены в таблице 1. На второй конец образца установлен нагреватель, изготовленный из намотанного на медный каркас высокоомного провода. В образце перпендикулярно к его оси сделано два отверстия малого диаметра, в которых монтируются измерительные контакты: потенциметрические контакты для измерения сопротивления и спай термопары для измерения перепада температур. В медный и латунный образцы потенциметрические контакты впаяны, в алюминиевом и дюралюминиевом образцах в отверстия ввёрнуты латунные винты, к которым припаяны потенциметрические контакты.

Образец окружён коаксиальным экраном, нижний конец которого термализуется с тем же основанием, что и образец, а на верхнем конце установлен нагреватель (также изготовленный из высокоомного провода) на одном уровне с нагревателем образца. Перепад температур между «горячими» концами образца и экрана контролируется отдельной термопарой. В ходе эксперимента подбирается мощность нагрева экрана так, чтобы перепад температур (термоЭДС этой термопары) обращался в ноль.

При измерении сопротивления образца измерительный ток пропускается через весь образец, токоведущие провода крепятся к основанию ячейки и к корпусу нагревателя образца.

Для уменьшения количества проводов и количества используемых приборов некоторые цепи экспериментальной ячейки коммутируются при переключении между режимами измерения сопротивления и теплопроводности. Переключатели установлены на основании ячейки, оба переключателя во время эксперимента должны находиться в одинаковом положении («измерение сопротивления» или «измерение теплопроводности»).

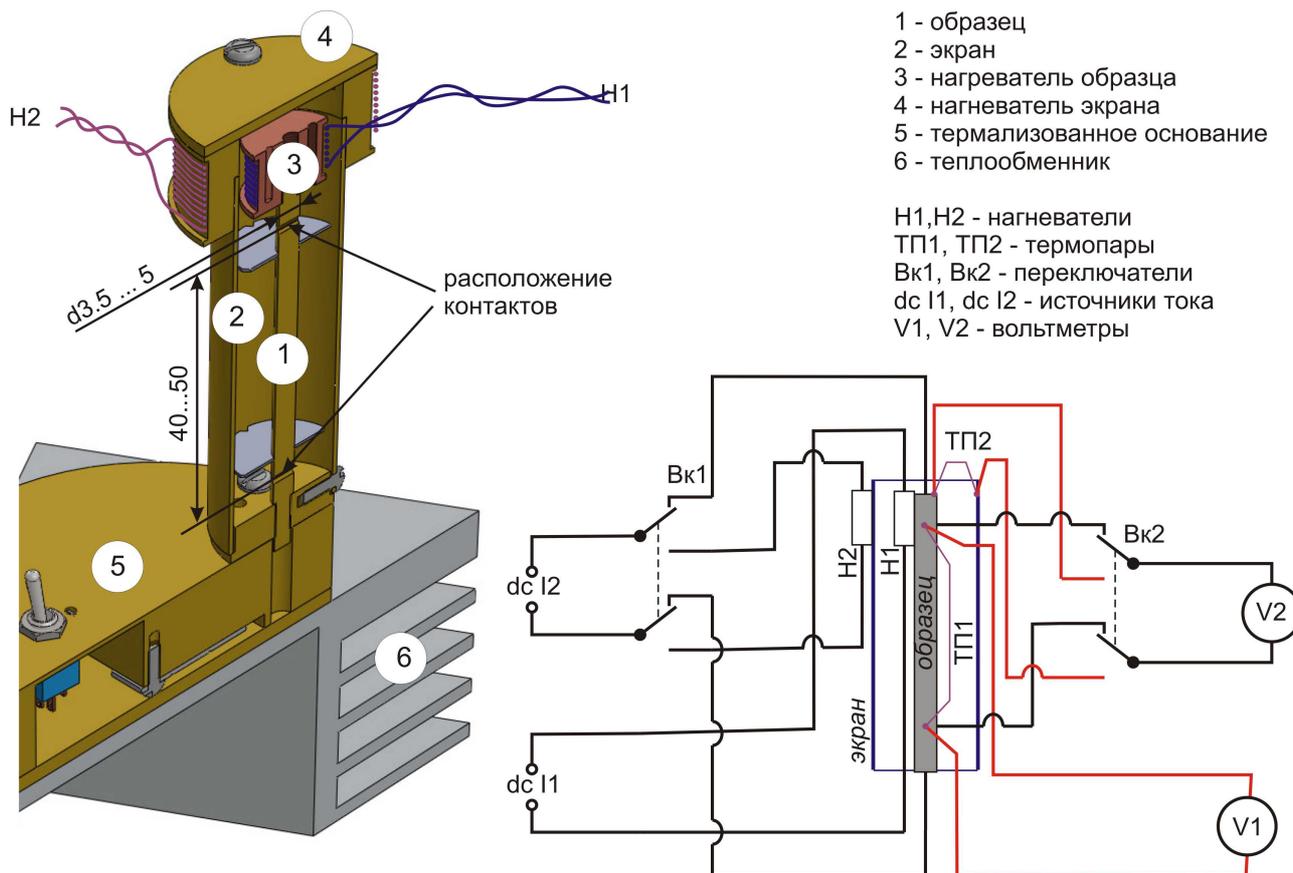


Рисунок 1: Эскиз экспериментальной ячейки и схема электрических цепей экспериментальной ячейки. На схеме переключатели Вк1 и Вк2 показаны в положении измерения сопротивления.

Таблица 1: Материалы и геометрические параметры образцов в различных экспериментальных ячейках.

Номер ячейки	Материал образца	Диаметр образца d, мм	Расстояние между измерительными точками l, мм
1	медь	5	50
2	латунь	5	50
3	алюминий	3.5	42
4	дюралюминий	5	50
5	медь	5	50

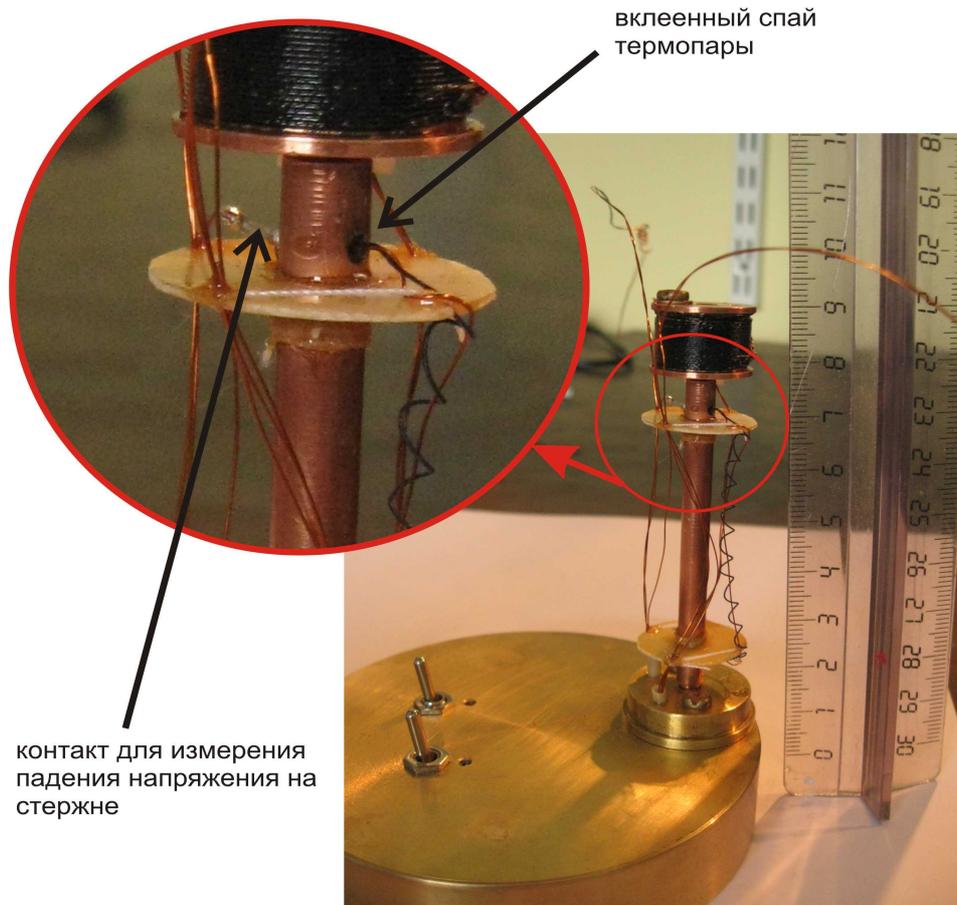


Рисунок 2: Изображение одной из экспериментальных ячеек без компенсирующего экрана. На увеличенном фрагменте показан один из измерительных контактов.

Используемое оборудование

Фотография установки с подключенной экспериментальной ячейкой показана на рисунке 3. Используемые приборы показаны на рисунке 4.



Рисунок 3: Экспериментальная установка

В эксперименте используется два вольтметра В7-78/1, используемых для измерения термоЭДС термопар при измерении теплопроводности и падения напряжения при измерении сопротивления, два источника постоянного тока INSTEK GPR30H10D, используемые для питания нагревателей экрана и образца при измерении теплопроводности и для пропускания тока через образец при измерении сопротивления, и вольтметр В7-38, используемый для точного измерения напряжения на нагревателе образца при измерении теплопроводности.

В зависимости от положения переключателей на основании ячейки один из источников используется для пропускания тока через образец или для нагрева экрана, а один из вольтметров — для измерения падения напряжения на образце или для измерения термоЭДС между образцом и экраном. На вольтметрах и источниках наклеены этикетки на лицевой панели, указывающие к чему они подключены.

Вольтметр В7-78/1



Рисунок 4: Используемые приборы: источники тока (слева) и вольтметры (справа)

Вольтметр используется для измерения падения напряжения на образце при измерении сопротивления и термоЭДС на термопарах.

Штекеры проводов от ячейки втыкаются для измерения напряжения в правые гнезда на лицевой панели. В некоторых случаях может быть удобно поменять штекеры местами для изменения полярности индицируемого напряжения.

Вольтметр должен находиться в режиме измерения постоянного напряжения, шкала 100 мВ. Этот режим индицируется строкой «Range:100 mVDC» на экране вольтметра.

Количество индицируемых разрядов на экране вольтметра регулируется кнопками «Установка» (треугольные кнопки на правой стороне лицевой панели). Необходимо установить максимальное число знаков (четыре знака после запятой, младший разряд 0.1 мкВ).

Переключатель входных каналов «Фронт/Тыль» (круглая кнопка рядом с гнездами подключения проводов) должен находиться в отжатом положении («Фронт»).

Источник тока INSTEK GPR30H10D

Источник тока INSTEK GPR30H10D позволяет получать напряжения до 300В при токе до 1А.

Перед включением или выключением источника, при подключении или отключении ячейки, при переключении полярности подключения ячейки всегда необходимо выводить до нуля (в крайнее левое положение) ручки регулировки напряжения.

Источник может работать либо в режиме стабилизации по току, либо в режиме стабилизации по напряжению. При подключении к исправной ячейке из-за низкого сопротивления цепи источник всегда работает в режиме стабилизации по току, напряжение на клеммах не превышает 10В. Источник имеет встроенные индикаторы тока и напряжения.

При обнаружении на индикаторе источника напряжения больше 10В необходимо приостановить выполнение работы и обратиться к преподавателю или лаборанту!

При работе рекомендуется выставить ручку грубой регуляции напряжения в среднее положение, ток в цепи выставляется ручками грубой и точной регулировки тока. Величина тока в цепи считывается с индикатора источника тока (точность индикации 1 мА).

Вольтметр В7-38

Вольтметр В7-38 подключен к клеммам источника тока, питающего нагреватель образца. Он используется для точного измерения напряжения на нагревателе образца.

Для упрощения схемы вольтметр подключен не к самому нагревателю, а к клеммам вольтметра — то есть измеряется падение напряжения на нагревателе и на подводящих проводах. Это даёт систематическое завышение вычисляемой мощности нагрева. Сопротивление нагревателя около 12 Ом, сопротивление подводящих проводов — около 0.6 Ом.²

Вольтметр В7-38 должен находиться в режиме измерения постоянного тока. Эти вольтметры не имеют отдельного выключателя питания, для удобства они подключены через удлинитель (сетевой фильтр) с отдельным выключателем. Выключатель сетевого фильтра должен быть включён.

Термопары

В работе используются медь-константановые термопары. При комнатной температуре чувствительность термопары равна 43 мкВ/К.

2 Приближённых данных по сопротивлению нагревателя и подводящих проводов достаточно для оценки соответствующей систематической погрешности в работе. При желании сопротивление нагревателя и проводов конкретной ячейки может быть непосредственно измерено мультиметром В7-78/1 в режиме измерения сопротивления. Для определения сопротивления подводящих проводов можно измерить тем же мультиметром сопротивление токоподводящих проводов, используемых для пропускания тока через образец в режиме измерения сопротивления: длина этих проводов та же, а сопротивление образца пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением проводов.

Выполнение измерений

1. По номеру экспериментальной ячейки (напечатан на наклейке и выбит на крышке экрана и основании ячейки) определите исследуемый материал.
2. Перед включением приборов убедитесь, что ручки регулировки напряжения и тока на источниках тока находятся в крайнем левом положении.
3. Включите вольтметры и источники тока, дайте приборам прогреться несколько минут. Установите ручки грубой регулировки напряжения на источниках тока в среднее положение. Убедитесь, что вольтметры находятся в надлежащих режимах измерения.
4. Проведите измерение вольт-амперной характеристики образца для определения сопротивления:
 - Переведите переключатели на основании экспериментальной ячейки в положение «измерение сопротивления»;
 - Увеличивая ток от 0 до 1 А, измерьте вольт-амперную характеристику образца;
 - Выведите ток до нуля (обе ручки регулировки тока в левом положении), измените полярность подаваемого тока (полярность подключения вольтметра при этом не изменять) и повторите измерения;
 - По окончании измерений выведите ток до нуля.
5. Измерьте зависимость перепада температур между измерительными точками образца от выделяемой на нагревателе мощности:
 - Переведите переключатели на основании экспериментальной ячейки в положение «измерение теплопроводности»;
 - Проверить работоспособность установки. Для этого подать на некоторое время (~1 минуты) на нагреватель образца ток 0.3-0.4А и убедиться, что начинает увеличиваться (по модулю) напряжение на обеих термопарах. Для термопары, измеряющей температуру между нагревателями образца и экрана, обратить внимание на знак возникающего напряжения — этот знак соответствует перегреву образца относительно экрана и, следовательно, в дальнейшем при регулировке нужно будет увеличивать мощность на нагревателе экрана при установлении напряжения такого знака;
 - По окончании проверки вывести ток до нуля;
 - Провести несколько (5-7) измерений перепада температур на образце для разных значений мощности нагрева. Максимальный допустимый перепад температур около 15 °С. Для первой точки удобно брать ток нагревателя образца около 0.2А. При каждом измерении необходимо, зафиксировав ток нагревателя образца, подбирать ток нагревателя экрана так, чтобы в установившемся режиме как можно точнее занулялось напряжение на термопаре между образцом и экраном. По установлении равновесия фиксируются: время установления равновесия, ток и напряжение на нагревателе образца, напряжение на термопаре образца, ток через нагреватель экрана, напряжение на термопаре между образцом и экраном;
 - По окончании измерений выведите ручки регулировки тока в левое положение.

6. Установите ручки регулировки тока и напряжения на источниках тока в левое положение и выключите приборы.
7. Анализ полученных данных:
 - По вольт-амперной характеристике определите сопротивление фрагмента образца между измерительными точками. Так как измеряемое сопротивление мало, может присутствовать заметный вклад от сдвига нуля вольтметра или паразитных термоЭДС, поэтому измеренная вольт-амперная характеристика может не проходить через ноль: $U = U_0 + R \times I$;
 - По зависимости $\Delta T(P)$ определите тепловое сопротивление образца $\Delta T = A \times P$;
 - Определите постоянную Лоренца вашего образца $L = \frac{\kappa}{\sigma T} = \frac{P R}{\Delta T} \times \frac{1}{T} = \frac{R}{A} \times \frac{1}{T}$, температуру можно принять равной средней температуре эксперимента.
8. Сравните измеренное значение постоянной Лоренца с теоретическим и табличными значениями (таблицы 2, 3). Объясните возможные причины отличия результатов. Для анализа причин погрешности рекомендуется вычислить удельное сопротивление и коэффициент теплопроводности и сравнить их с табличными (см. Приложение). Геометрические параметры образцов приведены в таблице 1.

Контрольные вопросы

1. Что такое поверхность Ферми? Порядок величины энергии Ферми и импульса Ферми в нормальных металлах.
2. Проводимость, теплоёмкость и теплопроводность вырожденного электронного ферми-газа.
3. В каких случаях выполняется закон Видемана-Франца?
4. Какой метод измерения сопротивления позволяет исключить сопротивление подводящих проводов?
5. Какие возможны способы уменьшения потерь тепла при измерении теплопроводности?

Приложение

Оценка времени установления теплового равновесия в образце

При измерении теплопроводности важно добиться равновесного состояния образца, когда устанавливается равновесный градиент температур.

Оценим время выравнивания температуры в медном стержне длиной $L=10\text{ см}$ при комнатной температуре в отсутствие потерь тепла. Плотность меди $\rho=8.96\text{ г/см}^3$, коэффициент теплопроводности меди примем равным $\kappa=3.8\text{ Вт/(см}\cdot\text{К)}$.

В длинном стержне можно считать что тепловое равновесие поперёк стержня устанавливается мгновенно по сравнению с тепловым равновесием вдоль стержня, а перенос тепла подчиняется одномерному уравнению теплопроводности: $c\frac{\partial T}{\partial t}=-\kappa\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, где c — теплоёмкость единицы объёма). Отсюда из соображений размерности сразу понятно, что время установления равновесия: $\tau\sim\frac{cL^2}{\kappa}$.

Поскольку температура порядка дебаевской, то для оценки применима классическая теория теплоёмкости: $c=3R\frac{\rho}{\mu}$ (здесь речь идёт о теплоёмкости на единицу объёма, R - газовая постоянная, $\mu=64\text{ г/моль}$ - молярная масса меди).

Окончательно получаем: $\tau=3R\frac{\rho L^2}{\kappa\mu}=92\text{ сек}$.

В нашем опыте длина стержня чуть меньше, но и теплопроводности образцов латуни, дюралюминия и алюминия меньше, так что эта оценка изменится несущественно. Таким образом, характерное время наступления теплового равновесия — минута. Для подбора мощности компенсации нужно несколько итераций, что приводит к затратам времени около 20 минут на одно измерение установившегося перепада температур.

Табличные данные для постоянной Лоренца, удельного сопротивления и коэффициента теплопроводности используемых материалов

Табличные значения приводятся для сравнения с результатами измерения. Необходимо, однако, иметь в виду, что эти характеристики зависят от чистоты металлов, а для сплавов — от их точного состава. Кроме того, при вычислении этих характеристик по результатам эксперимента, необходимо иметь в виду, что точность измерения диаметра образца 0.1 мм, а точность определения расстояния между измерительными точками (и возможный разброс расстояний между потенциометрическими контактами и между спаями термопары) до 2 мм.

Таблица 2: Значения постоянной Лоренца для различных металлов. По книге Ч.Киттеля «Введение в физику твёрдого тела».

Металл	$L \times 10^8$, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{К}^2}$		Металл	$L \times 10^8$, $\frac{\text{Вт} \cdot \text{Ом}}{\text{К}^2}$	
	0 °C	100 °C		0 °C	100 °C
Ag	2.31	2.37	Pb	2.47	2.56
Au	2.35	2.40	Pt	2.51	2.60
Cd	2.42	2.43	Sn	2.52	2.49
Cu	2.23	2.33	W	3.04	3.20
Ir	2.49	2.49	Zn	2.31	2.33
Mo	2.61	2.79			

Таблица 3 Удельное сопротивление, коэффициент теплопроводности и температура Дебая³ используемых материалов. Данные для комнатной температуры. По различным источникам.

Материал	ρ , $\times 10^{-8}$ Ом·м	κ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	Θ_D , К
медь	1.55...1.78	370...401	347
латунь	6...9	97...110	
алюминий	2.5...2.7	220...270	433
дюраль	5.2...8.6	120...170	

³ Температура Дебая приводится только для чистых металлов.