

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Государственное высшее учебное заведение
«Национальный горный университет»

Методические указания
к лабораторной работе № **6.2**

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ОТ
ТЕМПЕРАТУРЫ**

г. Днепропетровск
2011

Методические указания к лабораторной работе № 6.2 «Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры» по разделу «Физика твердого тела» курса физики для студентов всех специальностей.

Сост.: И.П. Гаркуша,
Днепропетровск: ГВУЗ «НГУ», 2011 г.

Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры

Принадлежности: Прибор для изучения температурной зависимости сопротивления металлов. Металлические образцы.

Цель работы: Определение температурного коэффициента сопротивления металла.

Теоретические сведения.

Электрическое сопротивление R – физическая величина, характеризующая противодействие проводника движущимся в нем носителям электрического тока. Электрическое сопротивление обусловлено преобразованием электрической энергии в другие виды (преимущественно в тепловую).

При постоянном токе электрическое сопротивление R участка цепи равно отношению приложенного к нему напряжения U к силе протекающего тока I при отсутствии на этом участке источников ЭДС (закон Ома)

$$I = \frac{U}{R}. \quad (1)$$

Его называют омическим или активным сопротивлением. Оно зависит от свойств материала проводника, его размеров, формы, а также от внешних условий (в частности, от температуры). Единицей сопротивления служит Ом, равный сопротивлению такого проводника, в котором при напряжении в 1 В течет ток силой в 1 А.

Для однородного по составу проводника длиной l при постоянной площади поперечного сечения S

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2)$$

где ρ – **удельное сопротивление** – физическая величина, равная электрическому сопротивлению цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения. Удельное сопротивление ρ характеризует материал проводника. Если сопротивление R выражено в омах, длина l – в метрах, и сечение S – в квадратных метрах, то удельное сопротивление ρ будет выражаться в омах, помноженных на метр (ом·метр).

Часто вместо сопротивления проводника R применяют обратную величину $\frac{1}{R}$ – **электропроводность**. Точно так же вместо удельного сопротивления ρ применяют обратную величину $\gamma = \frac{1}{\rho}$ – **удельную электропроводность** вещества.

Таблица 1.

Величина	Единица измерения в СИ
электрическое сопротивление R	1 Ом (ом)
электропроводность $\frac{1}{R}$	$\frac{1}{\text{Ом}} = \text{См}$ (сименс)
удельное сопротивление ρ	1 Ом·м (ом·метр)
удельная электропроводность $\gamma = \frac{1}{\rho}$	$\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}} = \frac{\text{См}}{\text{м}}$ (сименс на метр)

Удельная электропроводность входит в **закон Ома для плотности тока** (иначе – закон Ома в дифференциальной форме): в твердом однородном материале плотность тока в любой точке проводника равна произведению удельной электропроводности проводника на напряженность электрического поля \vec{E} :

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \gamma \vec{E}. \quad (3)$$

Из всех металлов наибольшую удельную электропроводность имеет серебро. Электропроводность меди только на 10% меньше электропроводности серебра, притом медь во много раз дешевле, поэтому применяемые в электротехнике высококачественные провода чаще всего изготавливаются из меди. Наряду с медью для изготовления проводов применяют железо, которое для предотвращения от ржавчины оцинковывают. Железо обладает большой механической прочностью, оно значительно дешевле меди, но его удельная электропроводность в шесть раз меньше, чем у меди. Для изготовления проводов применяют также алюминий, удельное сопротивление которого только в полтора раза превышает сопротивление меди.

С ростом температуры электрическое сопротивление проводников увеличивается, с понижением – уменьшается. При очень низких температурах сопротивление некоторых металлов и сплавов падает до нуля (сверхпроводимость).

Экспериментально установлено, что в довольно широком интервале температур удельное сопротивление большинства металлов растет с температурой приблизительно по линейному закону

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (4)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление проводника при 0 °С, t – температура по шкале Цельсия, α – **температурный коэффициент сопротивления**, численно равный примерно 1/273.

Переходя к абсолютной температуре, получим

$$\rho = \rho_0 \alpha T \quad (5)$$

или

$$\alpha \sim \frac{1}{T} \quad (6)$$

Температурный коэффициент сопротивления – физическая величина, характеризующая электрические свойства металла и численно равная отношению увеличению удельного сопротивления этого металла при повышении его температуры на один градус.

Для большинства металлов в довольно широком интервале температур α изменяется в пределах $(33 - 62) \cdot 10^{-4}$ град⁻¹ (см. таблицу 2).

Например, повышение температуры железа до 600 °С вызывает почти восьмикратное увеличение его удельного сопротивления. Повышение температуры до 500 °С вызывает примерно трехкратное увеличение сопротивления меди.

Удельные сопротивления и температурные коэффициенты сопротивления некоторых металлов и сплавов (при $t = 18^\circ\text{C}$) показаны в таблице.

Таблица 2.

	Удельное сопротивление, ρ , нОм·м	Температурный коэффициент сопротивления, α , 10^{-4} град ⁻¹
<i>Чистые металлы</i>		
Серебро	15,8	41
Медь	17,5	43
Золото	22	40
Алюминий	27	38
Вольфрам	53	51
Цинк	60	37
Никель	73	27
Железо	100	62
Платина	108	38
Олово	113	45

Свинец	208	42
Сурьма	340	
Ртуть	954	8,8
Висмут	1180	
<i>Сплавы</i>		
Манганин (85% меди, 12% марганца, и 3% никеля)	390	0,08
Константан (58,8% меди, 40% никеля и 1,2% марганца)	470	0,04
Нихром (67,5% никеля, 15% хрома, 16% железа и 1,5 % марганца)	1050	2

Особенностью приведенных здесь сплавов является тот факт, что, несмотря на несколько большее, чем у чистых металлов, удельное сопротивление, их температурный коэффициент сопротивления гораздо меньше. Это означает, что в широком интервале температур такие сплавы практически не изменяют своего омического сопротивления.

На рис. 1 представлена зависимость удельного сопротивления некоторых металлов от температуры, полученная на опыте. Из рисунка видно, что удельные сопротивления свинца, железа и меди при нагревании значительно возрастают. Сопротивление же константана, например, при этом осталось бы почти неизменным.

Высокая электропроводность металлов связана с тем, что в них имеется большое количество носителей тока — *электронов проводимости*, образующихся из валентных электронов атомов металла. Электрический ток в металле возникает под действием внешнего электрического поля, которое вызывает упорядоченное движение электронов.

Согласно *классической теории электропроводности* металлов электроны проводимости в металле ведут себя подобно молекулам идеального газа. Движущиеся под действием поля электроны сталкиваются с ионами, образующими кристаллическую решетку металла, рассеиваются на неоднородностях ионной решетки (на примесях, дефектах решетки). При этом электроны теряют импульс, а энергия их движения преобразуется во внутреннюю энергию кристаллической решетки, что и приводит к нагреванию проводника при прохождении по нему электрического тока.

Таким образом, электрическое сопротивление металлов обусловлено соударениями свободных электронов с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки металла. Классическая теория дала качественное объяснение законов постоянного тока. Однако она не смогла дать правильного объяснения зависимости сопротивления от температуры.

В *квантовой теории* электрический ток – упорядоченное движение электронов в металле – рассматривается как процесс распространения электронных дебройлевских

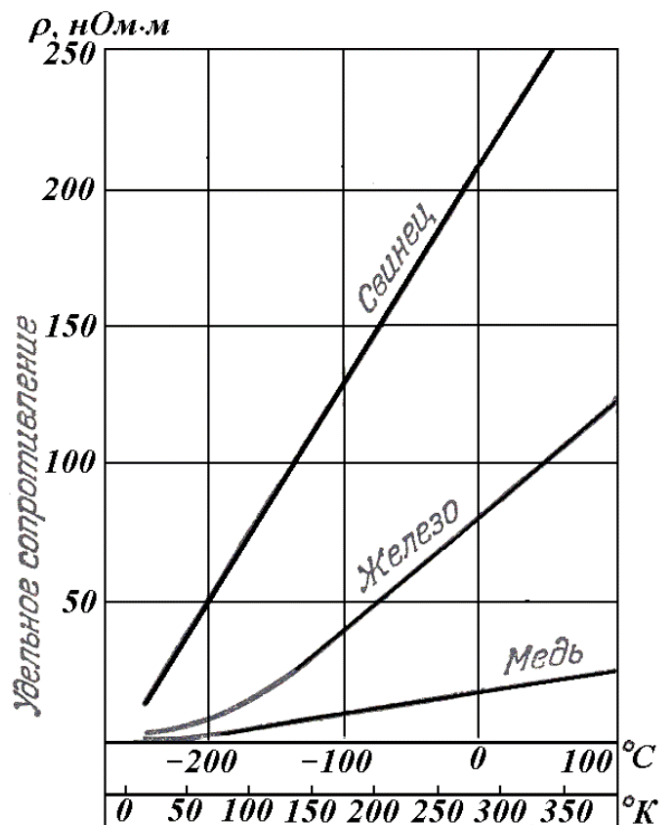


Рис. 1.

волн. Причиной электрического сопротивления чистых металлов является рассеяния этих электронных волн на ионах решетки, совершающих тепловые колебания.

Совершенно правильная, идеальная кристаллическая решетка, в узлах которой находятся **неподвижные** ионы, не рассеивает электронные волны. В такой решетке отсутствуют центры рассеяния — неоднородности, искажения правильности решетки, превосходящие по размерам длину дебройлевских волн. Поток свободных электронов должен проходить сквозь такую решетку беспрепятственно.

Подобная решетка не оказывала бы никакого сопротивления для движения электронов. Электрическое сопротивление металла было бы равно нулю, если бы ионы решетки металла были неподвижны.

Однако хорошо известно, что при любой температуре частицы твердого тела в узлах решетки **совершают колебания**. Хаотические тепловые колебания частиц в узлах кристаллической решетки создают в ней флуктуации плотности. За счет тепловых колебаний расстояния между частицами в решетке, а, следовательно, и плотность вещества, могут быть неодинаковыми в соседних малых объемах внутри металла. Результатом тепловых колебаний частиц в узлах решетки является появление местных неоднородностей плотности. Линейные размеры областей в металле, где проявляются эти неоднородности, значительно больше, чем длина дебройлевских волн. Таким образом возникают центры рассеяния электронных волн. Кроме того, реальные решетки всегда содержат примесные атомы и дефекты структуры, на которых также рассеиваются электронные волны.

По квантовой теории металлов удельная электропроводность

$$\gamma = \frac{n_0 e^2 \langle \lambda_F \rangle}{p_F} \quad (7)$$

где n_0 — число электронов проводимости в единице объема металла, e — заряд электрона, $\langle \lambda_F \rangle$ — средняя длина свободного пробега электронных волн в металле, p_F — импульс электрона, находящегося на уровне Ферми.

Из величин, входящих в эту формулу, от температуры зависит только средняя длина свободного пробега электронных волн $\langle \lambda_F \rangle$. С повышением температуры возрастает рассеяние электронных волн на тепловых колебаниях узлов решетки и уменьшается средняя длина их свободного пробега. При этом $\langle \lambda_F \rangle$, а следовательно и γ , в хорошем согласии с опытными данными (см. формулу (6)) обратно пропорциональны абсолютной температуре

$$\gamma \sim \frac{1}{T} \quad (8)$$

В соответствии с формулой (4) зависимость сопротивления металлического образца от температуры определяется линейной функцией:

$$R = R_0 (1 + \alpha t) \quad (9)$$

где R_0 — сопротивление образца при температуре 0°C , α — температурный коэффициент сопротивления, t — температура металла в градусах Цельсия.

Если вычислить производную от R по t , получим

$$\frac{dR}{dt} = R_0 \alpha \quad (10)$$

Известен геометрический смысл производной — производная равна тангенсу угла наклона φ к графику функции — прямой $R = f(t)$ (см. рис.2).

Следовательно

$$\operatorname{tg} \varphi = R_0 \alpha$$

откуда получаем расчетную формулу для температурного коэффициента сопротивления α

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \operatorname{tg} \varphi \quad (11)$$

Вывод. Если на опыте определить зависимость сопротивления R образца от температуры и изобразить результаты опыта на графике, то наклон прямой позволяет определить температурный коэффициент сопротивления α .

Описание установки.

Лабораторная установка состоит из электропечи с размещенными внутри нее исследуемыми образцами и измерительного устройства, соединенных кабелем (рис.3).

Электропечь служит для нагревания образцов, температура которых измеряется датчиком температуры. На передней панели электропечи находится окно, через которое видны образцы в печи. На этой же панели помещены выключатель «СЕТЬ» и переключатель образцов «ОБРАЗЕЦ». Положения переключателя: «1» – металл, «2» – сплав, «3» – полупроводник, «0» – вход закорочен.

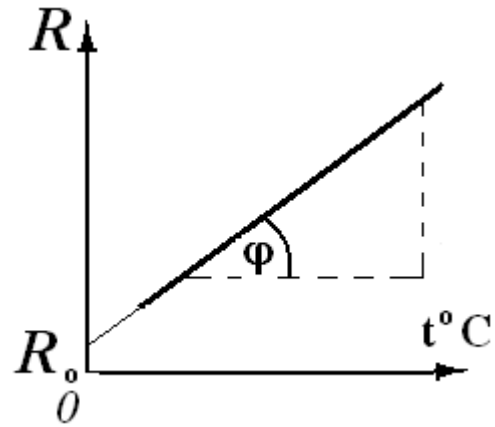


Рис. 2.



Рис.3.

На панели **измерительного устройства** расположены:

- жидкокристаллический индикатор (в верхней части – температуры в градусах Цельсия, t °С, в нижней – сопротивления в Ом, R Ohm), а также режимов работы (отображается в правом верхнем углу).
- кнопки «НАГРЕВ» и «ВЕНТ» – предназначены для включения и выключения (путем повторного нажатия) электропечи и вентилятора. При включенной печи на индикаторе появляется надпись «WARM», при включенном вентиляторе – «COOL».
- кнопка «СТОП ИНД» – предназначена для включения и выключения (путем повторного нажатия) режима остановки индикации значений температуры и сопротивления при снятии показаний с индикаторов (в работе **не используется**).

Порядок выполнения работы.

1. Подключают сетевые шнуры в сеть и включают установку выключателями «СЕТЬ» на задней панели устройства измерения и передней панели электропечи (выполняет преподаватель). Прогревают установку 3 – 5 минут. Переключатель «ОБРАЗЕЦ» ставят в положение «1».

Измерения начинают с комнатной температуры. Затем повышают температуру, для чего нажимают кнопку «НАГРЕВ». При этом на индикаторе появится надпись «WARM», а в печи засветится лампочка. Наблюдая за показаниями индикатора, через каждые 10°С записывают одновременные показания температуры и сопротивления и заносят их в таблицу.

2. Максимальное значение температуры нагрева 110°С. Печь выключается повторным нажатием кнопки «НАГРЕВ» при температуре 100°С, за счет тепловой инерции печи произойдет нагрев до 110 °С.

3. Затем производят те же измерения при охлаждении в обратном порядке. Вентилятор для охлаждения включается кнопкой «ВЕНТ». При этом лампочка в печи должна погаснуть, и появляется надпись – «COOL». Снова через каждые 10°С, но при охлаждении записывают одновременные показания температуры и сопротивления и помещают их рядом с полученными при нагревании в таблице.

На этом эксперимент заканчивается. По окончании работы необходимо отключить питание установки выключателем «СЕТЬ».

4. Далее **приступают к расчету**. Выбирают масштаб и наносят точки на график зависимости R от $t^{\circ}C$. Проводят прямую линию, которая хорошо ложится на все точки. Продлевают график до пересечения с осью ординат. По координате точки пересечения определяют R_0 – сопротивление проводника при 0 °С.

5. Рассчитывают $\text{tg } \varphi$ – тангенс угла наклона прямой $R = R(t^{\circ})$. Для уравнения (10) тангенс угла наклона – величина размерная, его размерность – Ом/град.

6. Определяют температурный коэффициент сопротивления металла по формуле:

$$\alpha = \frac{\text{tg } \varphi}{R_0}.$$

7. По построенному графику определяют сопротивление R проводника при 18 °С. Затем, зная длину проводника $l = 4,85$ м и его диаметр $d = 0,05$ мм, рассчитывают удельное сопротивление проводника ρ при $t^{\circ} = 18$ °С по формуле

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{R_{18}\pi d^2}{4l}.$$

8. Получив значения α и ρ , по таблице 2 определяют, из какого материала изготовлен исследуемый образец.

Примечание. В электронном читальном зале библиотеки НГУ и на сайте «НГУ, факультет будівництва, кафедра фізики, лабораторні роботи» можно получить программу построения графика и вычисления наклона прямой. Программу разработала студентка гр.ЗИ-06 М.Щетовская.

Таблица результатов опыта

NN п/п	$t, ^{\circ}C$	$R, \text{ Ом}$		$R_0, \text{ Ом}$	$\text{tg } \varphi,$ Ом/град	$\alpha, \text{ град}^{-1}$	$\rho,$ нОм·м
		<i>нагрев</i>	<i>охлаждение</i>				
1	20						
2.	30						

Контрольные вопросы.

1. Какова природа электрического сопротивления? .
2. Что называется удельным сопротивлением? Удельной электропроводностью? Какие у них единицы измерения?
3. Какова идея определения температурного коэффициента сопротивления металла в данной работе?

Литература

1. Кучерук И. М., Горбачук И.Т, Луцик П.П . Т.3. Оптика. Квантовая физика. К.; «Техніка», 2006, – 520 с.
2. Трофимова Т.И. Курс физики – М., «Академия», 2005, – 560 с.
3. Савельев И.В. Курс физики Т.3:Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. М.: «Наука», 1989, – 304с.

Составители И.П.Гаркуша, Е.А.Якунин

Контрольные измерения

NN п/п	t, °C	R, Ом		R ₀ , Ом	tg φ, Ом/град	α, град ⁻¹	ρ, нОм·м
		нагрев	охлаждение				
1	20	43,4	43,3	40,24	0,170	0,0042 = 42·10 ⁻⁴	17,85
2.	25	44,2					
3.	30	45,1	45,4				
4.	35	45,6	46,3				
5.	40	46,8	47,4				
	45	47,8					
	50	48,5	49,4				
	55	49,4					
	60	50,1	51,1				
	70	51,8	52,9				
	80	53,5	54,5				
	90	55,2	55,9				
	100	57,0	57,2				
	110	58,6					

Вывод: материал– медь.