

## Лабораторная работа №4

### Изучение закона Ома и определение удельного сопротивления нихромовой проволоки

Цель работы – проверка закона Ома в дифференциальной и интегральной формах. Оценка скорости упорядоченного движения и концентрации свободных электронов в металле, определение удельного сопротивления нихромовой проволоки, исследование зависимости сопротивления проводника от его длины.

Приборы и принадлежности: лабораторная установка и микрометр.

Экспериментально было установлено, что носителями тока в металлах являются свободно перемещающиеся по металлу электроны. Согласно классическим представлениям электрическое сопротивление металлов обусловлено соударениями свободных электронов с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки металла.

Если предположить, что у каждого атома освободится по одному электрону, то концентрация  $n$  свободных электронов будет равна количеству атомов в единице объема:

$$n = \left( \frac{\delta}{M} \right) N_A \quad (1)$$

где  $\delta$  – плотность металла;  $M$  – молярная масса;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро. При упорядоченном движении электронов со скоростью  $v$  через единичную площадку, перпендикулярную току, в единицу времени переносится электрический заряд, величина которого равна модулю вектора плотности тока  $\vec{j}$ :

$$\vec{j} = env, \quad (2)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – абсолютное значение заряда электрона (элементарный заряд).

Одним из главных способов возбуждения электрического тока в телах является создание и поддержание в них электрического поля, которое в дальнейшем будем считать однородным ( $\vec{E} = \text{const}$ ). Как показывает опыт, для многих тел (например, металлов) в широких пределах плотность электрического тока  $\vec{j}$  пропорциональна напряженности электрического поля  $\vec{E}$ :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость;  $\rho$  – удельное сопротивление материала – величины постоянные для данного материала и зависящие от физического состояния тела (температуры, давления и т.п.). Они определяют способность тела проводить электрический ток. Формула (3) представляет собой закон Ома в дифференциальной форме.

Рассмотрим случай, когда электрические токи текут вдоль тонких проводов (проволок) (рис.1).

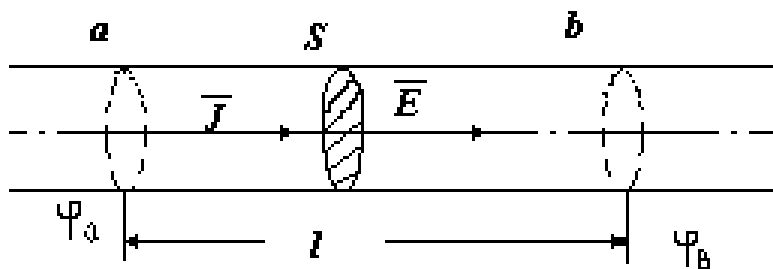


Рис.1

Направление тока (упорядоченное движение положительных зарядов) будет совпадать с направлением оси провода и плотность тока  $\vec{j}$  может считаться одинаковой во всех точках поперечного сечения провода. Через поперечное сечение провода площади  $S$  в единицу времени проходит количество электричества (электрический заряд)  $\Delta q$

$$\mathbf{I} = \frac{\Delta q}{\Delta t} = j S, \quad (4)$$

называемое силой тока или просто током. Если по проводнику течет ток, то в силу закона сохранения электрического заряда, сила тока  $\mathbf{I}$  не изменяется со временем. В дальнейшем будем считать, что электрический ток в проводнике возбуждается только силами однородного электрического поля.

Воспользуемся законом Ома в дифференциальной форме (3) и запишем для напряженности электрического поля выражение

$$\mathbf{E} = \rho j = \rho \frac{\mathbf{I}}{S}. \quad (5)$$

Умножим это соотношение на элемент длины провода  $d\mathbf{l}$  и проинтегрируем полученное выражение по участку проводника  $ab$  (рис.1):

$$\int_{a \rightarrow b} \mathbf{E} d\mathbf{l} = \mathbf{I} \int_{a \rightarrow b} \rho \frac{d\mathbf{l}}{S}. \quad (6)$$

Величина  $\mathbf{I}$  выносится из-под знака интеграла, т.к. сила тока  $\mathbf{I}$  одинакова во всем проводнике.

Левая часть формулы (6) есть не что иное, как разность потенциалов (напряжение  $\mathbf{U}$  на участке  $ab$ )  $\varphi_a - \varphi_b = \mathbf{U}$  (рис.1):

$$\mathbf{U} = \varphi_a - \varphi_b = \int_{a \rightarrow b} \mathbf{E} d\mathbf{l}. \quad (7)$$

Интеграл в правой части формулы (6), определяемый как

$$\mathbf{R} = \int_{a \rightarrow b} \rho \frac{d\mathbf{l}}{S} \quad (8)$$

есть величина, характеризующая данный участок проводника, по которому течет электрический ток. Эта величина  $\mathbf{R}$  называется электрическим сопротивлением или просто сопротивлением участка проводника. Если проводник изготовлен из однородного материала постоянного поперечного сечения, то из (8) получается известная формула:

$$\mathbf{R} = \rho \frac{l}{S}. \quad (9)$$

Таким образом, из (6) – (8) вытекает закон Ома для участка цепи в интегральной форме:

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{R}}. \quad (10)$$

Напряженность однородного электрического поля  $\mathbf{E}$ , как видно из (7), связана с напряжением  $\mathbf{U}$  на участке проводника длиной  $l$  соотношением:

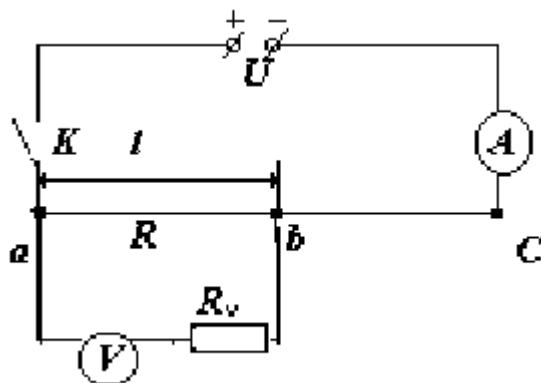
$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{U}}{l}. \quad (11)$$

### Методика эксперимента

Для определения удельного сопротивления собирают электрическую цепь, схематично показанную на рис.2, где между точками **a** и **c** включена проволока исследуемого материала.

Рис.2

Измеряя силу тока в цепи и напряжение на участке "**ab**" длиной **l** (при замкнутом



положении ключа **K**), можно рассчитать, в соответствии с законом Ома, сопротивление этого участка цепи по формуле:

$$R = \frac{U_v}{I_a - \frac{U_v}{R_v}}, \quad (12)$$

где  $U_v$  и  $I_a$  – показания вольтметра и амперметра соответственно, а  $R_v$  – внутреннее сопротивление вольтметра. Если ток через вольтметр, равный  $I_v = \frac{U_v}{R_v}$ , много меньше тока  $I_a$ , то для расчета сопротивления можно воспользоваться приближенной формулой:

$$R = \frac{U_v}{I_a}. \quad (13)$$

Измеряя диаметр **d** проволоки, можно рассчитать площадь ее поперечного сечения:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (14)$$

Из соотношений (9), (13) и (14) для удельного сопротивления окончательно получаем расчетную формулу:

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4 l} \frac{U_v}{I_a}. \quad (15)$$

Для оценки погрешности  $\sigma_\rho$  в определении удельного сопротивления, в соответствии с соотношением (15), можно воспользоваться формулой:

$$\frac{\sigma_\rho}{\rho} = \sqrt{4 \left( \frac{\sigma_d}{d} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_l}{l} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{U_v}}{U_v} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{I_a}}{I_a} \right)^2} \quad (16)$$

Погрешность  $\sigma_\rho$ , как видно из формулы (16), будет минимальна при максимальной длине **l** и как можно большем токе  $I_a$ .

Для экспериментальной проверки закона Ома для участка цепи, не изменяя напряжение источника **U**, измеряют силу тока  $I_a$  и напряжение  $U_v$  на исследуемом участке "**ab**" цепи. Результаты измерений представляют графически в виде зависимости  $U_v = U_v(I_a)$ . Если экспериментальные точки в пределах точности измерений ложатся на прямую (рис.3), то это может являться экспериментальным подтверждением закона Ома в интегральной форме.

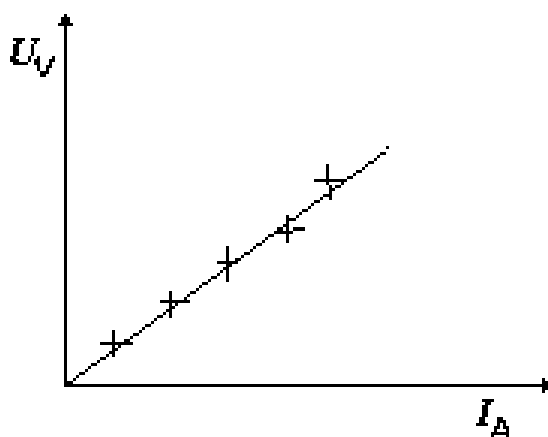


Рис.3

Для проверки формулы (9), отражающей зависимость сопротивления проволоки от ее длины, измеряют сопротивление  $R$  при разных длинах  $l$  проволоки. Результаты измерений представляют графически в виде зависимости  $R = R(l)$ . Поскольку проволока однородна ( $\rho = \text{const}$ ) и имеет одинаковую толщину ( $S = \text{const}$ ), то экспериментальные точки должны находиться на прямой, не проходящей через начало координат (рис.4).

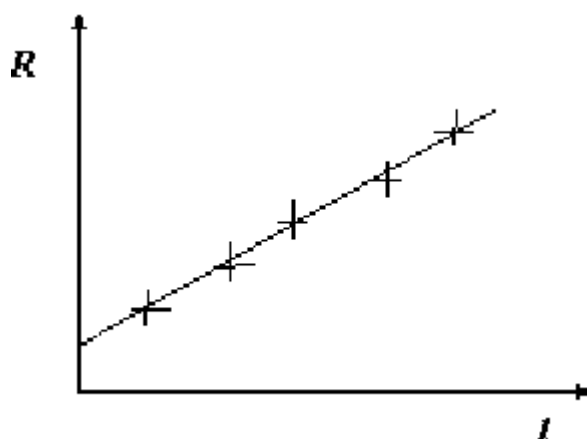


Рис.4

Для определения напряженности электрического поля в проводнике измеряют, падение напряжения  $U$  на участках проводника при разных длинах  $l$  проволоки. Результаты измерений представляют в виде зависимости  $U = U(l)$ . Если поле  $E$  в проводнике однородно, график зависимости  $U(l)$  будет представлять собой прямую линию (рис.5), угловой коэффициент которой равен напряженности электрического поля в проводнике.

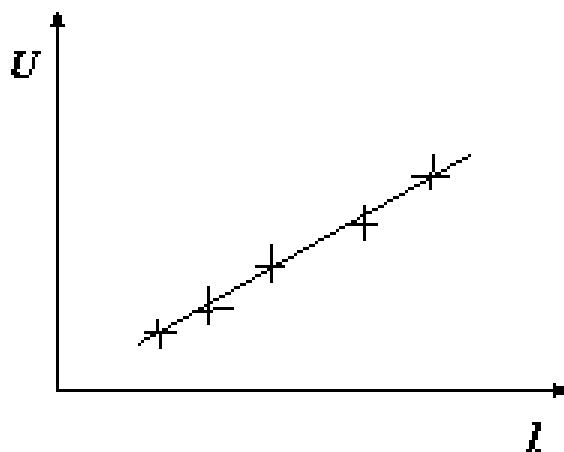


Рис.5

Порядок измерений. Обработка результатов измерений

1. Измерьте микрометром или штангенциркулем диаметр проволоки по всей ее длине в 5-7 точках. Найдите среднее значение диаметра  $\bar{d}$  и оцените погрешность  $\sigma_d$ .
2. Соберите электрическую цепь по схеме рис.2. Установите максимальную длину проволоки. Измерьте силу тока  $I_a$  при 8-10 значениях  $U$ . Результаты занесите в табл.1.
- 3.

Таблица 1

$U_v, B$										
$I_a, A$										

Затем постройте график зависимости  $U=U(I)$ , из которого определите сопротивление проводника  $\bar{R}$ . По формуле (15) рассчитайте удельное сопротивление  $\bar{\rho}$ . Оцените погрешность  $\sigma_p$ .

4. Экспериментально проверьте зависимость сопротивления  $R$  проволоки от ее длины  $l$ . Для этого при 5-7 значениях длины  $l$  запишите в табл.2 показания  $U_v$  вольтметра и  $I_a$  амперметра. Вычислите значения  $R_i=(U_{vi} / I_{ai})$  ( $i=1,2,3,\dots,7$ ). Постройте график зависимости  $R=R(l)$ .

Таблица 2

$l, m$							
$U, B$							
$I, A$							
$R, \Omega m$							

5. Установите максимальное значение силы тока  $I_a$ , протекающего по проводнику. Найдите плотность тока  $j=I/S$ , измерьте падение напряжения  $U_l$  при 5-7 разных значениях длины  $l$  проволоки. Результаты занесите в табл.3.

Таблица 3

$l, m$							
$U_l, B$							

Затем постройте график зависимости  $U=U(l)$  и определите напряженность электрического поля  $E = \frac{\Delta U}{\Delta l}$  в проводнике. Оцените погрешность  $\sigma_E$ . Рассчитайте удельное сопротивление проволоки

исходя из закона Ома в дифференциальной форме:  $\rho = \frac{E}{j}$ . Оцените погрешность  $\sigma_\rho$  и запишите окончательный результат  $\rho \pm \sigma_\rho$ .

5. Нихром представляет собой сплав (67,5%-Ni, 15%-Cr%, 16%-Fe, 1,5%-Mn), молярная масса которого  $M=0,058$  кг/моль, плотность  $\delta=8,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. По формулам (1) и (2) оцените концентрацию  $n$  и скорость  $v$  упорядоченного движения электронов при протекании тока по нихромовому проводнику. Сравните скорость  $v$  со средней скоростью теплового движения электронов при данной температуре  $T$ :

$$\vec{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \text{ где } k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/кг} - \text{постоянная Больцмана, } m=9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} - \text{масса электрона. Какие}$$

выводы можно сделать из такого сравнения?

### Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим током?
2. Дайте определение силы и плотности тока.
3. Сформулируйте закон Ома в интегральной и дифференциальной формах.
4. Что называется удельным сопротивлением проводника? От чего зависит удельное сопротивление?
5. Выведите формулу (12).
6. При каких упрощающих предположениях получена формула (15)?
7. Получите формулу (16) для оценки погрешности  $\sigma_p$ .
8. Какое электрическое поле называют однородным? Укажите связь между напряженностью электрического поля и падением напряжения на участке проводника.