

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

# Отчёт о выполнении лабораторной работы

## 1.1.1

Определение удельного сопротивления  
нихромовой проволоки

Автор:  
Сенокосов Арсений Олегович  
Б02-012

# 1 Введение

**Цель работы:** измерить удельное сопротивление тонкой проволоки круглого сечения, изготовленной из нихромового сплава.

**В работе используются:** линейка, штангенциркуль, микрометр, отрезок проволоки из нихрома, амперметр, вольтметр, источник ЭДС, мост постоянного тока, реостат, ключ.

В работе используются следующие методы измерения сопротивления:

1. определение углового коэффициента наклона зависимости напряжения на проволоке от тока через неё;
2. измерение с помощью моста постоянного тока.

## 2 Теоретические сведения

Удельное сопротивления однородной проволоки круглого сечения можно определить по следующей формуле:

$$\rho = R \frac{\pi d^2}{4l}, \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление проволоки,  $d$  – её диаметр,  $l$  – длина.

Согласно закону Ома напряжение  $V$  и ток  $I$  в образце связаны соотношением

$$V = RI.$$

Для измерения напряжения и тока используем схему на *рис. 1*.

Т.к. используемый вольтметр неидеален необходимо сделать поправку на его сопротивление  $R_V$ .

Показания амперметра  $I_A$  и вольтметра  $V_B$  связаны следующим соотношением

$$V_B = R' I_A,$$

где  $R'$  – сопротивление параллельно соединённых проволоки и вольтметра.

При этом  $\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_V} + \frac{1}{R}$ , и  $R_V \gg R, R'$ .

Таким образом, график зависимости  $V_B(I_A)$  должен представлять прямую, угловой коэффициент которой есть  $R'$ , откуда сопротивление образца может быть найдено по следующей формуле:

$$R = \frac{R_V R'}{R_V - R'} \approx R' \left( 1 + \frac{R'}{R_V} \right) \quad (2)$$

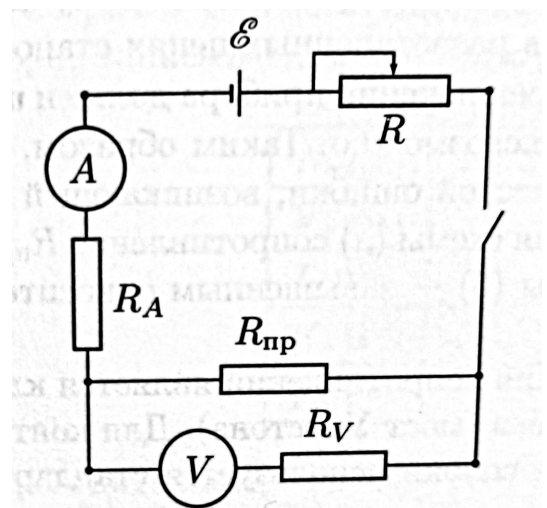


Рис. 1: Схема цепи

### 3 Оборудование и экспериментальные погрешности

**Штангенциркуль:**  $\Delta_{шт} = \pm 0,01$  мм

**Микрометр:**  $\Delta_{мкм} = \pm 0,005$  мм

**Вольтметр:**

Система	Магнито-электрическая
Класс точности	0,5
Предел измерений	0,75 мА
Цена деления	$5 \cdot 10^{-3}$ В = 5 мВ
Чувствительность	200 дел./В
Внутреннее сопротивление	5 кОм
Погрешность при считывании со шкалы	$\pm 2,5$ мВ
Максимальная погрешность по классу точности	$\pm 3,75$ мВ

**Амперметр:**

Система	Цифровая
Предел измерения	2 А
Разрядность дисплея	5 ед.
Внутреннее сопротивление	$R_A = 1,4$ Ом

В диапазоне измерения  $R$  от 1 до 10 Ом относительная поправка к сопротивлению согласно ф-ле (2) составляет  $\approx 10^{-4}\%$  (при  $R' = 10$  Ом и  $R_V = 5$  кОм). Поэтому эта поправка пренебрежимо мала и не оказывает значительного влияния на последующие измерения. Поэтому далее будем считать, что

$$R \approx R'$$

**Мост постоянного тока Р4833:**

Класс точности	0,1
Разрядность магазина сопротивлений	5 ед.
Исследуемый диапазон измерений	$10^{-4} - 10$ Ом (для множителя $N = 10^{-2}$ )
Погрешность измерений в используемом диапазоне	$\pm 0,010$ Ом

### 4 Результаты измерений и обработка данных

#### 4.1 Измерение диаметра $d$ проволоки

Измерения проводились штангенциркулем и микрометром для  $N = 10$  различных участков проволоки. При измерении штангенциркулем получено  $d = 0,36$  мм для всех участков. При измерении микрометром были получены следующие показания:

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d$ , мм	0,35	0,36	0,36	0,35	0,36	0,36	0,36	0,35	0,36	0,36

Таблица 1: Измерение диаметра проволоки микрометром

Среднее значение диаметра  $\bar{d} = \frac{\sum d_i}{N} = 0,357$  мм.

Случайная погрешность измерения  $\sigma_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum (d_i - \bar{d})^2} \approx 0,001$  мм.

С учётом инструментальной погрешности  $\Delta_{\text{мкм}} = 0,005$  мм погрешность диаметра может быть вычислена как  $\sigma_d^{\text{полн}} = \sqrt{\sigma_d^2 + \Delta_{\text{мкм}}^2} \approx 0,005$  мм.

*Окончательные результаты измерения диаметра проволоки:*

- Штангенциркулем:  $d = 0,36 \pm 0,01$  мм
- Микрометром:  $0,357 \pm 0,005$  мм ( $\epsilon = 1,4\%$ )

## 4.2 Измерение сопротивления проволоки

Результаты измерений зависимостей показания вольтметра  $V_B$  от показаний амперметра  $I_A$  в схеме на *рис. 1* представлены в *Таблице 2*. Соответствующие графики зависимостей изображены на *рис. 2*.

Пользуясь методом наименьших квадратов, строим аппроксимирующие прямые  $V_B = \bar{R}I_A$ , определяя их угловой коэффициент по формуле

$$\bar{R} = \frac{\langle VI \rangle}{\langle I^2 \rangle}.$$

$l = 20$ см										
$V_B$ , дел.	145	119	85	54	40	44	55	70	81	142
$V_B$ , мВ	725	595	425	270	200	220	275	350	405	710
$I_A$ , мА	334,16	275,28	194,88	123,62	92,33	102,75	127,91	162,69	186,32	328,03
$l = 30$ см										
$V_B$ , дел.	149	120	91	71	52	59	67	78	94	124
$V_B$ , мВ	745	600	455	355	260	295	335	390	470	620
$I_A$ , мА	227,16	182,61	138,14	107,99	78,89	90,03	101,51	117,83	142,59	189,22
$l = 50$ см										
$V_B$ , дел.	150	136	114	92	77	88	105	130	143	125
$V_B$ , мВ	750	680	570	460	385	440	525	650	715	625
$I_A$ , мА	139,06	125,81	105,1	85,15	71,16	81,32	97,09	120,46	132,55	115,25

Таблица 2: Зависимость  $V_B$  от  $I_A$  для разных длин проволоки  $l$ .

Случайную погрешность определения углового коэффициента вычисляем как

$$\sigma_R^{\text{сл}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left( \frac{\langle V^2 \rangle}{\langle I^2 \rangle} - \bar{R}^2 \right)},$$

где  $n = 10$  – число измерений.

Теперь оценим систематическую погрешность, которая возникает из-за неточности используемых приборов. Полагая, что при всех измерениях относительная погрешность неизменна, оценим погрешность вычисления частного  $R = V/I$  при максимальных значениях  $V$  и  $I$ :

$$\Delta_R^{\text{сист}} \approx R \sqrt{\left( \frac{\Delta_V}{V_{\text{max}}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta_I}{I_{\text{max}}} \right)^2}$$

Тогда полная погрешность измерения  $R$  вычисляется следующим образом:

$$\sigma_R^{\text{полн}} = \sqrt{(\sigma_R^{\text{сл}})^2 + (\Delta_R^{\text{сист}})^2}.$$

Результаты вычислений приведены в *Таблице 3*. Там же представлены результаты измерения сопротивления при помощи моста Р4833.

$l$ , см	$\bar{R}$ , Ом	$\sigma_R^{\text{сл}}$ , Ом	$\sigma_R^{\text{сист}}$ , Ом	$\sigma_r^{\text{полн}}$ , Ом	$\varepsilon$ , %	$R_{\text{мост}}$ , Ом
20	2,170	0,008	0,007	0,011	0,5	$(2,174 \pm 0,010)$
30	3,270	0,009	0,011	0,014	0,4	$(3,276 \pm 0,010)$
50	5,382	0,017	0,018	0,025	0,5	$(5,363 \pm 0,010)$

Таблица 3: Результаты измерения сопротивления проволоки

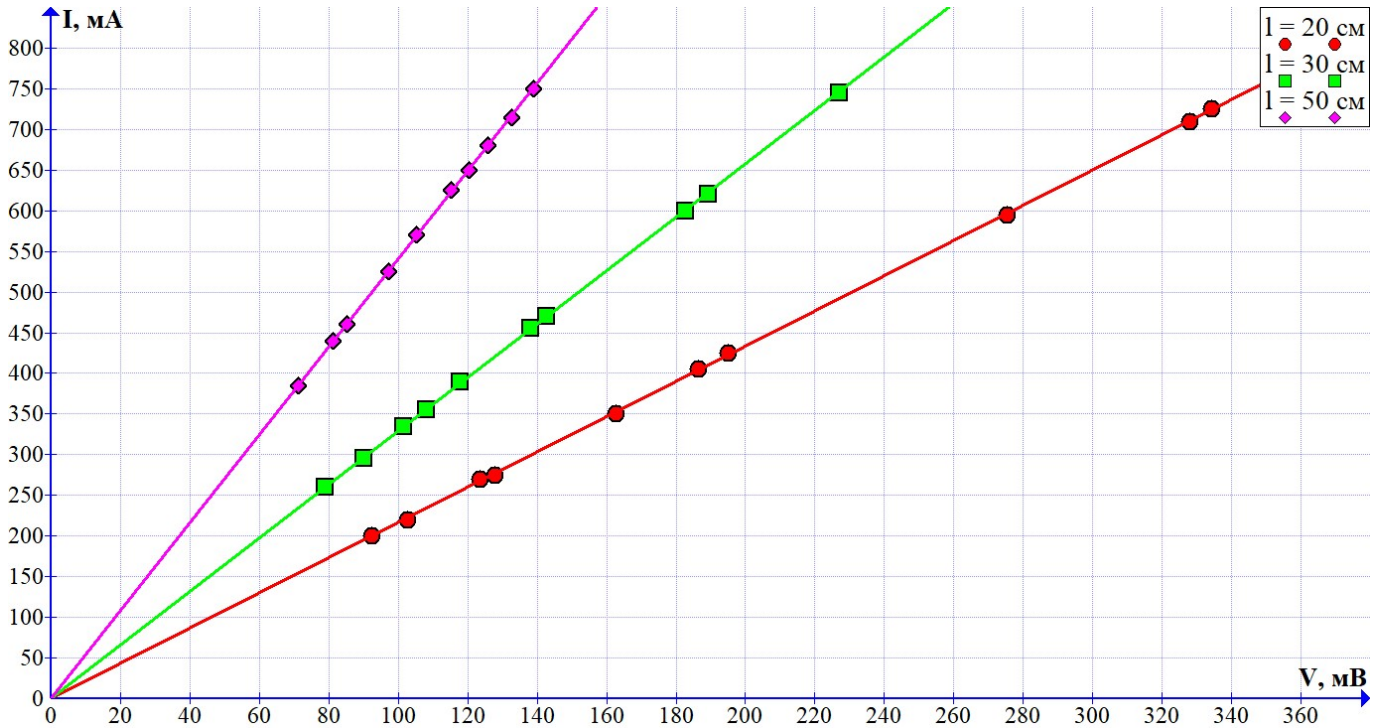


Рис. 2: Результаты измерений напряжения  $V_B$  в зависимости от тока  $I_A$  для проволок разной длины  $l$  и их линейная аппроксимация  $y = kx$ .

Таким образом, относительная погрешность измерения сопротивления достаточно мала и находится на уровне 0,5%. Также вычисленные значения сопротивления достаточно хорошо совпадают с измерениями при помощи моста.

### 4.3 Вычисление удельного сопротивления

По формуле (2) находим удельное сопротивление материала проволоки, используя значения, полученные в п. 4.2. Относительную погрешность вычисления  $\rho$  определяем по следующей формуле и заносим результаты в *таблицу 4*:

$$\sigma_\rho = \rho \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_d}{d}\right)^2}.$$

Усредняя результаты трёх опытов, окончательно получаем:

$$\bar{\rho} = (1,086 \pm 0,032) \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} (\varepsilon_\rho = 2,9\%)$$

	$\rho, \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	$\sigma_\rho, \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	$\varepsilon_\rho, \%$
$l = 20 \text{ см}$	1,086	0,032	3,0
$l = 30 \text{ см}$	1,092	0,032	2,9
$l = 50 \text{ см}$	1,079	0,032	2,9

Таблица 4: *Результат измерения удельного сопротивления*

## 5 Обсуждение результатов и выводы

В ходы работы было получено значение удельного сопротивления нихромовой проволоки с точностью  $\sim 3\%$ . Табличные значения для нихрома лежат в диапазоне  $0,99 \dots 1,12 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  в зависимости от состава различных сплавов. Измеренные значения  $\rho = (1,086 \pm 0,032) \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  попадают в нужный диапазон, однако они не позволяют точно определить марку сплава.

Точность измерения удельного сопротивления  $\rho$  существенно ограничивается измерением диаметра проволоки. Поскольку случайная ошибка измерения диаметра оказалась меньше цены деления прибора (микрометра), уточнение значения диаметра за счет многократных измерений невозможно. По той же причине не удалось проверить, насколько однородной является проволока по сечению.