

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра общей и технической физики

## ОТЧЕТ

по лабораторной работе №6

«Изучение сопротивлений низкоомных материалов»

Выполнил: студент гр. ТХН-22  
(шифр группы)

\_\_\_\_\_ (подпись)

Демидчик М.В.  
(Ф.И.О.)

Дата: \_\_\_\_\_

Проверил преподаватель: \_\_\_\_\_  
(должность)

\_\_\_\_\_ (подпись)

\_\_\_\_\_ (Ф.И.О.)

Санкт-Петербург  
2023

**Цель работы:** определение удельного сопротивления, контактного сопротивления, и удельной теплопроводности металлов низкоомных материалов с помощью измерительного усилителя.

### **Краткое теоретическое содержание**

**Явления, изучаемые в работе:** сопротивление материалов – алюминия и меди.

**Определения основных физических понятий, объектов, процессов и величин:**

1. Электронный газ — модель в физике твердого тела, описывающая поведение электронов в телах с электронной проводимостью.
2. Электрический ток – всякое упорядоченное движение электрических зарядов. Электрический ток называется постоянным, если сила тока и его направление не изменяются с течением времени.
3. Сила тока – скалярная физическая величина, равная отношению заряда  $dq$ , переносимого сквозь рассматриваемую поверхность (в случае тока проводимости– через поперечное сечение проводника) за малый промежуток времени, к величине  $dt$  этого промежутка.
4. Электрическое сопротивление – отношение напряжения ( $U$ ) на участке электрической цепи к силе тока ( $I$ ).
5. Напряжение – отношение работы ( $A$ ) сил электрического поля при перемещении заряда ( $q$ ) из одной точки в другую к величине заряда.
6. Удельное сопротивление – сопротивление единицы длины проводника единичной площади сечения.
7. Электроны проводимости (свободные электроны) – носители тока, образовавшиеся из валентных электронов атомов металла, которые не принадлежат определенному атому, а являются общими электронами.
8. Плотность тока – направление электрического тока в различных точках рассматриваемой поверхности и распределение силы тока по этой поверхности.
9. Теплоемкость– физическая величина, численно равная отношению количества теплоты, сообщаемого телу, к изменению температуры тела в рассматриваемом термодинамическом процессе.
10. Длина свободного пробега электронов в проводниках – путь, который в среднем проходят электроны между двумя последовательными столкновениями с ионами решетки. В конце свободного пробега скорость электрона равна нулю, так как электрон отдает всю энергию ионам решетки.

**Законы и соотношения, описывающие изучаемые процессы, на основании которых, получены расчетные формулы:**

В соответствии с *атомно-кинетической теорией* идеальных газов средняя кинетическая энергия электронов, находящихся в состоянии непрерывного хаотического движения, линейно возрастает с температурой:

$$E_k = \frac{m_0 \bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

, где:  $\bar{u}$  – средняя скорость теплового движения, м/с;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж\*К<sup>-1</sup>,  $m$  – масса электрона, кг,  $T$  – температура, К.

*Закон Ома*: сила тока в однородном участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к участку, и обратно пропорциональна электрическому сопротивлению этого участка.

$$I = \frac{U}{R}$$

, где:  $R$  – сопротивление, Ом;  $U$  – напряжение, В;  $I$  – сила тока, А.

*Закон Ома для плотности тока*: плотность в проводнике пропорциональна напряженности поля:

$$J = \gamma \cdot E$$

, где:  $E$  – напряженность электрического поля, В/м,  $\gamma$  – удельная электропроводность, Ом<sup>-1</sup>\*м<sup>-1</sup>.

*Закон Видемана-Франца* – это физический закон, утверждающий, что для металлов отношение коэффициента теплопроводности к удельной электрической проводимости пропорционально температуре:

$$\frac{\lambda_T}{\gamma} = L_0 T$$

, где:  $\gamma$  – удельная проводимость, Ом<sup>-1</sup>\*м<sup>-1</sup>,  $L_0$  – число Лоренца, Вт\*Ом/К<sup>2</sup>,  $T$  – температура, К,  $\lambda$  – электронная теплопроводность, Вт\*м<sup>-1</sup>\*К<sup>-1</sup>.

### Схема установки

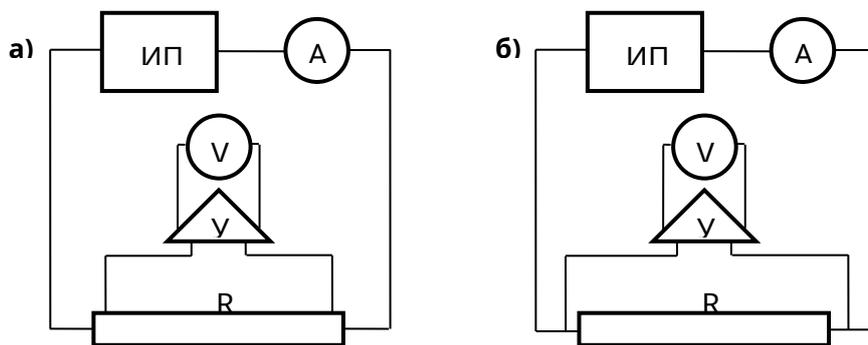


Рис.1. Принципиальная электрическая схема установки. ИП – источник питания, А – амперметр, V – вольтметр, У – измерительный усилитель, R – исследуемый образец с малым сопротивлением.

### Основные расчетные формулы

1.  $U_{обр} = \frac{U - U_0}{K}$ , где  $U$  – напряжение на выходе усилителя, В;  $U_0$  – точность установки нуля вольтметра, В;  $K$  – количество раз, в которое усиливается напряжение.

2.  $R = \frac{U_{обр}}{I}$ , где  $U_{обр}$  – напряжение, В;  $I$  – сила тока, А.

3.  $R_{\kappa} = R_n - R$ , где  $R_n$  – полное сопротивление стержня, Ом;  $R$  – среднее значение сопротивления стержня, Ом.

4.  $\rho = \frac{R \cdot \pi d^2}{4l}$ , где  $\pi d^2/4$  – площадь сечения проводника, м<sup>2</sup>;  $R$  – сопротивление, Ом;  $l$  – длина проводника, м.

5.  $n = \frac{\rho_0}{A} N_0$ , где  $\rho_0$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $A$  – атомная масса, кг/моль;  $N_0$  – число Авогадро.

6.  $\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ , где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура (300 К);  $m_0$  – масса электрона, кг.

7.  $\bar{l} = \frac{2m_0\bar{u}}{\rho e^2 n}$ , где  $e$  – заряд электрона, Кл;  $l$  – средняя длина свободного пробега, м;  $u$  – средняя скорость теплового движения, м/с.

8.  $\lambda_m = \frac{3k^2 e^{-2} T}{\rho}$ , где  $\lambda$  – удельная теплопроводность, Вт/м\*К.

### Формулы погрешности косвенных измерений

$$\Delta R = R \cdot \left( \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} \right)$$

$$\Delta \rho = \rho \cdot \left( \frac{\Delta R}{R} + \frac{2 \Delta S}{S} + \frac{\Delta l}{l} \right)$$

Таблица 1

Вольт-амперная характеристика алюминиевого стержня

$U_0 = 0$  В,  $K = 10^5$ ,  $U_{max} = 7,5$  В

I	А	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
U	В	0	0,75	1,05	1,50	1,95	2,45	2,95	3,45	3,90
$R_{Al}$	мкОм	0	30,00	21,00	20,00	19,50	19,60	19,67	19,71	19,50

Таблица 2

Измерение полного сопротивления

$$U_0=0 \text{ В}, K=10^1, U_{max}=1,5 \text{ В}$$

I	А	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
U	В	0	0,23	0,30	0,45	0,60	0,74	0,89	1,03	1,18
R <sub>п</sub>	МОм	0	92,00	60,00	60,00	60,00	59,20	59,33	58,86	59,00
R <sub>к</sub>	МОм	0	91,98	59,98	59,98	59,98	59,18	59,31	58,84	58,98

Таблица 3

Вольт-амперная характеристика медного стержня

$$U_0=0 \text{ В}, K=10^5, U_{max}=7,5 \text{ В}$$

I	А	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
U	В	0	0,55	0,70	0,95	1,20	1,45	1,75	2,00	2,30
R <sub>Cu</sub>	мкОм	0	22,00	14,00	12,67	12,00	11,60	11,67	11,43	11,50

Таблица 4

Измерение полного сопротивления

$$U_0=0 \text{ В}, K=10^1, U_{max}=7,5 \text{ В}$$

I	А	0	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
U	В	0	0,85	1,15	2,60	3,45	4,10	4,85	5,95	6,30
R <sub>п</sub>	Ом	0	0,34	0,23	0,35	0,35	0,33	0,32	0,34	0,32
R <sub>к</sub>	Ом	0	0,34	0,23	0,35	0,34	0,33	0,32	0,34	0,31

### Пример вычислений

А) Исходные данные

Удельное сопротивление алюминия  $\rho=0,0265 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$

Удельное сопротивление меди  $\rho=0,0168 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$

Длина стержня  $l=0,315 \text{ м}$

Диаметр стержня  $d=0,025 \text{ м}$

Б) Погрешности прямых измерений

$$\Delta U_1=0,005 \text{ В}$$

$$\Delta U_2=0,001 \text{ В}$$

$$\Delta l=0,001 \text{ м}$$

$$\Delta d=0,001 \text{ м}$$

$$\Delta I=0,025 \text{ А}$$

В) Вычисления величин и погрешностей косвенных измерений

1) Напряжение на образце

А) алюминия

$$U_{обр} = \frac{U - U_0}{K} = \frac{0,75 - 0}{10^5} = 0,75 \cdot 10^{-5} \text{ В}$$

Б) меди

$$U_{обр} = \frac{U - U_0}{K} = \frac{0,55 - 0}{10^5} = 0,55 \cdot 10^{-5} \text{ В}$$

2) Сопротивление проводника А) алюминий

$$R = \frac{U_{обр}}{I} = \frac{0,75 \cdot 10^{-5}}{0,25} \cdot 10^6 = 30 \text{ мкОм}$$

Б) медь

$$R = \frac{U_{обр}}{I} = \frac{0,55 \cdot 10^{-5}}{0,25} \cdot 10^6 = 22 \text{ мкОм}$$

3) Среднее значение сопротивлений

А) алюминия

$$R = \frac{\sum_{i=1}^9 R_i}{9} = 18,78 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Б) меди

$$R = \frac{\sum_{i=1}^9 R_i}{9} = 11,87 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

4) Контактное сопротивление

А) алюминия

$$R_k = R_n - R = 92 \cdot 10^{-3} - 18,78 \cdot 10^{-6} = 91,98 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Б) меди

$$R_k = R_n - R = 0,34 - 11,87 \cdot 10^{-6} = 0,34 \text{ Ом}$$

5) Удельное сопротивление

А) алюминия

$$\rho = \frac{R \cdot \pi d^2}{4l} = \frac{18,78 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot (0,025)^2}{4 \cdot 0,315} = 2,92 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Сравнение со справочным значением

$$\frac{|0,0265 \cdot 10^{-6} - 0,0292 \cdot 10^{-6}|}{0,0265 \cdot 10^{-6}} \cdot 100\% = 10,12\%$$

Б) меди

$$\rho = \frac{R \cdot \pi d^2}{4l} = \frac{11,87 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot (0,025)^2}{4 \cdot 0,315} = 1,84 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$\frac{|0,0168 \cdot 10^{-6} - 0,0184 \cdot 10^{-6}|}{0,0168 \cdot 10^{-6}} \cdot 100\% = 9,524\%$$

Сравнение со справочным значением

б) Концентрация свободных электронов

А) алюминия

$$n = \frac{\rho_0}{A} N_0 = \frac{2700 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{27 \cdot 10^{-3}} = 6,023 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$$

Б) меди

$$n = \frac{\rho_0}{A} N_0 = \frac{8920 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{63 \cdot 10^{-3}} = 8,53 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$$

7) Скорость теплового движения электронов

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 116826,16 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

8) Длина свободного пробега электронов

А) алюминия

$$\bar{l} = \frac{2m_0\bar{u}}{\rho e^2 n} = \frac{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 116826,16}{0,0265 \cdot 10^{-6} \cdot (1,61 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 6,023 \cdot 10^{28}} = 5,14 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

Б) меди

$$\bar{l} = \frac{2m_0\bar{u}}{\rho e^2 n} = \frac{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 116826,16}{0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot (1,61 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 8,53 \cdot 10^{28}} = 5,72 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

9) Удельная теплопроводность

А) алюминия

$$\lambda_m = \frac{3k^2 e^{-2} T}{\rho} = \frac{3 \cdot (1,38 \cdot 10^{-23})^2 \cdot 300}{0,0265 \cdot 10^{-6} \cdot (1,61 \cdot 10^{-19})^2} = 249,52 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Сравнение со справочным значением

$$\frac{|218 - 249,52|}{218} \cdot 100\% = 14,46\%$$

Б) меди

$$\lambda_m = \frac{3k^2 e^{-2} T}{\rho} = \frac{3 \cdot (1,38 \cdot 10^{-23})^2 \cdot 300}{0,0168 \cdot 10^{-6} \cdot (1,61 \cdot 10^{-19})^2} = 393,59 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Сравнение со справочным значением

$$\frac{|406 - 393,59|}{406} \cdot 100\% = 3\%$$

### Абсолютная погрешность косвенных измерений:

Погрешность для алюминиевого стержня

$$\Delta R = R \cdot \left( \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} \right) = 18,78 \cdot \left( \frac{0,025}{0,25} + \frac{0,05}{0,75} \right) = 3,13 \text{ мкОм}$$

$$\Delta \rho = \rho \cdot \left( \frac{\Delta R}{R} + \frac{2 \Delta S}{S} + \frac{\Delta l}{l} \right) = 2,92 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{3,13 \cdot 10^{-6}}{18,78 \cdot 10^{-6}} + \frac{2 \cdot 0,001}{0,025} + \frac{0,001}{0,315} \right) = 5,11 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Погрешность для медного стержня

$$\Delta R = R \cdot \left( \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} \right) = 11,87 \cdot \left( \frac{0,025}{0,25} + \frac{0,05}{0,55} \right) = 2,27 \text{ мкОм}$$

$$\Delta \rho = \rho \cdot \left( \frac{\Delta R}{R} + \frac{2 \Delta S}{S} + \frac{\Delta l}{l} \right) = 1,84 \cdot 10^{-8} \cdot \left( \frac{2,27 \cdot 10^{-6}}{11,87 \cdot 10^{-6}} + \frac{2 \cdot 0,001}{0,025} + \frac{0,001}{0,315} \right) = 5,04 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

### Окончательные результаты

$$R_{Al} = (18,78 \pm 3,13) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

$$R_{Cu} = (11,87 \pm 2,27) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

$$\rho_{Al} = (0,0292 \pm 0,00511) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$\rho_{Cu} = (0,0184 \pm 0,00504) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

**Вывод:** в лабораторной работе было определено полное и контактное сопротивление алюминиевого и медного стержней, рассчитаны косвенные погрешности. Полученное в результате лабораторной работы значение удельного сопротивления алюминия отличается от теоретического значения на 10,12%, экспериментальное значение удельной теплопроводности алюминия отличается от теоретического значения на 14,46%. Значение удельного сопротивления меди отличается от теоретического значения на 9,54 %, экспериментальное значение удельной теплопроводности меди - на 3%, эти незначительные расхождения могут быть вызваны неточностью измерения приборов, а в наибольшей степени человеческим фактором, и свидетельствуют об успешном результате эксперимента.