

**Отчет о выполнении лабораторной работы**  
**2.2.3 "Измерение теплопроводности воздуха**  
**при атмосферном давлении"**

Кириченко Варвара, Б03-402

**Цель работы:** измерить коэффициент теплопроводности воздуха при атмосферном давлении в зависимости от температуры.

**В работе используются:**

- цилиндрическая колба с натянутой по оси нитью ( $2r_1 = 50 \pm 3$  мкм,  $2r_0 = 7,0 \pm 0,1$  мм,  $L = 400 \pm 2$  мм);
- термостат ( $\sigma_t = 0,1$  °C);
- вольтметр ( $\varepsilon_U = 0,012\%$ ) и амперметр ( $\varepsilon_I = 0,05\%$ ) (цифровые мультиметры);
- источник постоянного напряжения;
- магазин сопротивлений ( $0,1$  Ом –  $99999,9$  Ом)

## 1. Теоретические сведения

Теплопроводность – это процесс передачи тепловой энергии от нагретых частей системы к холодным за счёт хаотического движения частиц среды. В газах теплопроводность осуществляется за счёт непосредственной передачи кинетической энергии от быстрых молекул к медленным при их столкновениях. Перенос тепла описывается законом Фурье, утверждающим, что плотность потока энергии  $\vec{q}$  пропорциональна градиенту температуры  $\nabla T$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T$$

где  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности. Его можно пропорционален квадратному корню из температуры:

$$\kappa \sim \lambda \bar{v} n c_V = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \frac{i}{2} R \propto \sqrt{T}$$

В случае, когда тепло выделяется в длинном проводе, размещенном в оси полого цилиндра той же длины и теплопроводность стационарна, нетрудно получить, что тепловая мощность провода равна

$$Q = \frac{2\pi L}{\ln r_0/r_1} \kappa \Delta T$$

где  $r_1$  – радиус провода,  $r_0$  – радиус цилиндра,  $L$  – длина провода,  $\Delta T$  – перепад температуры между проводом и стенками цилиндра.

## 2. Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 1. На оси полой цилиндрической трубки с внутренним диаметром  $2r_0$  размещена металлическая нить диаметром  $2r_1$  и длиной  $L$ . Полость трубки заполнена воздухом. Стенки трубки помещены в кожух, через которых пропускается вода из термостата, так что их температура  $T_0$  поддерживается постоянной.

Для измерения напряжения и тока используется два мультиметра, работающие в режимах вольтметра и амперметра соответственно. Подключение к нити  $R_n$  осуществляется по четырёхпроводной схеме. По двум проводам через сопротивление пропускается измерительный ток, а два других используются для параллельного подключения вольтметра.

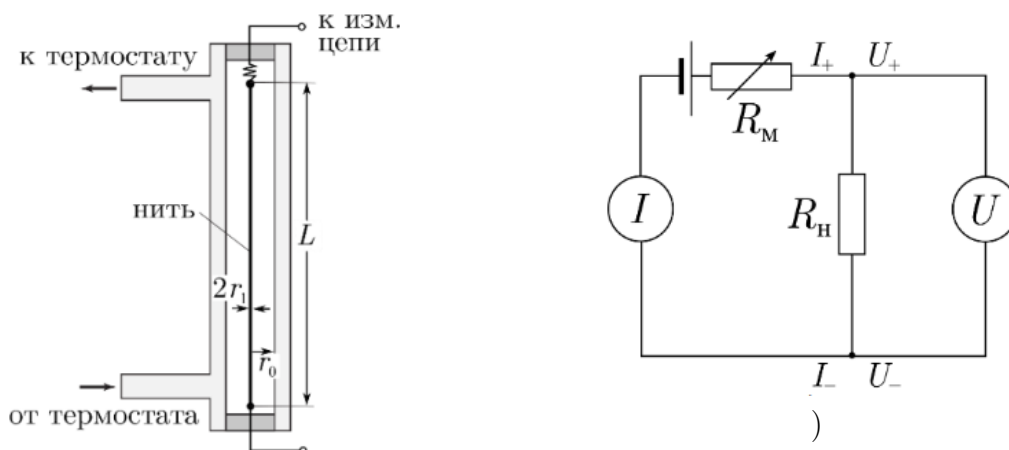


Рис. 1: Схемы установки и цепи

### 3. Проведение эксперимента

1. Предварительно рассчитаем максимальные допустимые значения напряжения  $U_{\text{макс}}$  и  $I_{\text{макс}}$  тока на нити из формулы

$$Q = \frac{2\pi L}{\ln r_0/r_1} \kappa \Delta T$$

используя приближенные значения параметров установки. Получим:

$$U_{\text{макс}} = 2,7 \text{ В} \quad I_{\text{макс}} = 130 \text{ мА}$$

2. Выставим максимальное значение сопротивления на магазине сопротивлений. Включим вольтметр и амперметр, настроим их на нужный режим работы. Запустим источник питания и термостат.
3. Выставим на термостате комнатную температуру и будем фиксировать показания приборов, постепенно уменьшая сопротивление магазина  $R_n$ . Занесем данные в таблицу 2. Значения сопротивления  $R_n$  были предварительно рассчитаны таким образом, чтобы мощность, выделяемая проволокой, возрастала монотонно в диапазоне от 0 до  $Q_{\text{max}}$  (таблица 1).
4. Вновь выставим на магазине максимальное сопротивление.
5. Повторим предыдущие два пункта еще шесть раз постепенно увеличивая температуру термостата и дожидаясь ее установления.
6. Выключим все измерительные приборы, блок питания, на магазине сопротивлений установим максимальное сопротивление, а на термостате установим комнатную температуру.

## 4. Обработка данных

7. Для каждой температуры построим зависимость  $R(Q)$  ( $R = \frac{U}{I}$ ,  $Q = UI$ ). Через точки проведем прямую МНК. Рассчитаем значения  $R_0 = R(0)$  и  $\frac{dR}{dQ}$  и занесем их в таблицу 3.
8. Через точки  $R_0$ , полученные в предыдущем пункте, построим прямую МНК. Получим зависимость  $R(T)$ . Рассчитаем температурный коэффициент сопротивления нити  $\alpha$  по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{R(T_0)} \frac{dR}{dT}, \quad T_0 = 273 \text{ K}$$

9. Используя результаты предыдущих пунктов, вычислим наклон зависимости выделяющейся на нити мощности  $Q$  от ее перегрева  $\Delta T$  относительно стенок:

$$\frac{dQ}{d\Delta T} = \frac{dR}{dT} / \frac{dR}{dQ}$$

Дополним таблицу 2.

10. Зная, что  $\frac{dQ}{d\Delta T} = \frac{2\pi L}{\ln r_0/r_1} \kappa$ , вычислим значение коэффициента теплопроводности  $\kappa$ :

$$\kappa = \frac{\ln r_0/r_1}{2\pi L} \frac{dQ}{d\Delta T}$$

Результаты также занесем в таблицу.

11. Построим график зависимости  $\kappa(T)$  в двойной логарифмическом масштабе. Заметим, что на прямую ложатся только первые три точки, поэтому будем использовать только их. Определим показатель степени в зависимости  $\kappa \propto T^\beta$ .

## 5. Расчет погрешностей

Определим относительную погрешность величин, полученных в пункте 7. Пусть зависимость  $R(Q)$  имеет вид  $R = kQ + b$ . Тогда:

$$\varepsilon_{\frac{dR}{dQ}} = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_U^2 + \varepsilon_I^2} = 0,9\%$$

$$\varepsilon_{R_0} = \sqrt{\varepsilon_b^2 + \varepsilon_U^2 + \varepsilon_I^2} = 0,08\%$$

Определим погрешность  $\frac{dR}{dT}$  из МНК:

$$\varepsilon_{\frac{dR}{dT}} = \sqrt{\varepsilon_k^2 + \varepsilon_{R_0}^2 + \varepsilon_t^2} = 2,0\%$$

Величина  $1/\varepsilon_{\frac{dR}{dT}} \approx 50$  удовлетворяет критерию Стьюдента при  $n - k - 1 = 1$  и  $p = 0,95$ , равному 12,7.

Погрешность величины  $\alpha$  выражается по формуле:

$$\varepsilon_\alpha = \sqrt{\frac{\sigma_k^2 T_0^2 + \sigma_b^2}{(kT_0 + b)^2} + \varepsilon_{\frac{dR}{dT}}^2} = 2,0\%$$

$$\alpha = 3,2 \pm 0,01 \frac{10^{-3}}{\text{К}}$$

Найдем погрешность  $\frac{dQ}{d\Delta T}$ :

$$\varepsilon_{\frac{dQ}{d\Delta T}} = \sqrt{\varepsilon_{\frac{dR}{dQ}}^2 + \varepsilon_{\frac{dR}{dT}}^2} = 2,2\%$$

Вычислим погрешность коэффициента теплопроводности:

$$\varepsilon_{\kappa} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{r_0}^2 + \varepsilon_{r_1}^2}{\ln^2(r_0/r_1)} + \varepsilon_L^2 + \varepsilon_{\frac{dQ}{d\Delta T}}^2} = 2,6\%$$

Наконец, определим погрешность коэффициента  $\beta$ :

$$\frac{\sigma_{\beta}}{\beta} = \frac{1}{\beta} \sqrt{\varepsilon_{\kappa}^2 + \varepsilon_t^2 + \sigma_k^2} = 13\%$$

$$\beta = 0.27 \pm 0.06$$

## 6. Вывод

В результате работы, несмотря на осложнения, вызванные данными, полученными при высоких температурах термостата, получилось определить температурный коэффициент сопротивления платины  $\alpha$ , приближенный к его действительному значению  $= 3,9 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{К}}$ . Однако коэффициент  $\beta$  сильно отличается от настоящего значения, равного  $= 0,5$ .

## 7. Приложения

$\eta$	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$R_m, \text{ Ом}$	207	50	28,4	19	13,4	9,5	6,7	4,5	2,7	1,2	0

Таблица 1: Значения  $R_m$ , подобранные для монотонного возрастания мощности, выделяемой нитью ( $Q = \eta \cdot Q_{\text{макс}}$ )

Таблица 2: Результаты измерений и вычислений

$T, ^\circ\text{C}$	23										
$U, \text{V}$	0,31	0,98	1,37	1,67	1,91	2,1	2,3	2,51	2,6	3,32	3,5
$I, \text{A}$	0,015	0,047	0,065	0,077	0,088	0,096	0,104	0,111	0,113	0,143	0,15
$R, \Omega$	20,6	20,9	21,1	21,6	21,7	21,9	22,1	22,6	23,0	23,2	23,3
$Q, \text{W}$	0,004	0,046	0,091	0,131	0,168	0,202	0,239	0,279	0,2938	0,474	0,525
$T, ^\circ\text{C}$	30										
$U, \text{V}$	0,32	1,01	1,38	1,67	1,92	2,14	2,31	2,47	2,62	3,33	3,5
$I, \text{A}$	0,015	0,047	0,064	0,076	0,087	0,095	0,102	0,109	0,115	0,14	0,15
$R, \Omega$	21,3	21,4	21,5	21,9	22,0	22,5	22,6	22,6	22,7	23,7	23,8
$Q, \text{W}$	0,0048	0,047	0,088	0,127	0,167	0,203	0,236	0,262	0,301	0,466	0,515
$T, ^\circ\text{C}$	40										
$U, \text{V}$	0,33	1,03	1,42	1,72	1,96	2,16	2,34	2,5	2,64	2,78	3,5
$I, \text{A}$	0,015	0,046	0,063	0,076	0,086	0,094	0,101	0,107	0,113	0,118	0,143
$R, \Omega$	22	22,4	22,5	22,6	22,8	22,9	23	23,3	23,4	23,5	24,47
$Q, \text{W}$	0,00495	0,0474	0,0894	0,131	0,168	0,203	0,236	0,267	0,291	0,328	0,501
$T, ^\circ\text{C}$	50										
$U, \text{V}$	0,34	1,05	1,45	1,74	1,98	2,1	2,4	2,5	2,6	2,8	2,9
$I, \text{A}$	0,015	0,046	0,062	0,074	0,084	0,092	0,099	0,103	0,106	0,113	0,117
$R, \Omega$	22,6	22,8	23,3	23,5	23,6	23,8	24,2	24,3	24,5	24,7	24,8
$Q, \text{W}$	0,0051	0,048	0,0899	0,128	0,166	0,185	0,237	0,257	0,275	0,316	0,339
$T, ^\circ\text{C}$	60										
$U, \text{V}$	0,35	1,07	1,47	1,77	2,01	2,21	2,38	2,54	2,68	2,81	2,92
$I, \text{A}$	0,015	0,045	0,0618	0,073	0,083	0,089	0,095	0,106	0,11	0,113	0,114
$R, \Omega$	23,3	23,7	23,8	24,2	24,5	24,8	25,05	25,1	25,2	25,5	25,6
$Q, \text{W}$	0,0052	0,0481	0,0908	0,1292	0,1648	0,1966	0,226	0,256	0,284	0,309	0,332
$T, ^\circ\text{C}$	70										
$U, \text{V}$	0,36	1,09	1,5	1,78	2,03	2,23	2,4	2,56	2,7	2,83	2,94
$I, \text{A}$	0,015	0,045	0,061	0,072	0,082	0,089	0,095	0,101	0,106	0,11	0,114
$R, \Omega$	24	24,2	24,5	24,7	24,75	25,32	25,26	25,3	25,4	25,72	25,8
$Q, \text{W}$	0,0054	0,049	0,0915	0,128	0,166	0,214	0,228	0,258	0,286	0,311	0,335

$t, ^\circ\text{C}$	23	30	40	50	60	70
$R_0, \Omega$	20,78	21,22	22,02	22,57	23,29	23,97
$\frac{dR}{dQ}, \Omega/\text{мВт}$	5,43	5,21	4,69	6,73	7,09	5,44
$\frac{dQ}{d\Delta T}, \text{мВт/К}$	12,4	13,0	14,4	10,07	9,55	12,45
$\kappa, \text{мВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	24,4	25,6	28,3	19,8	18,8	24,5

Таблица 3: Значения параметров для различных температур

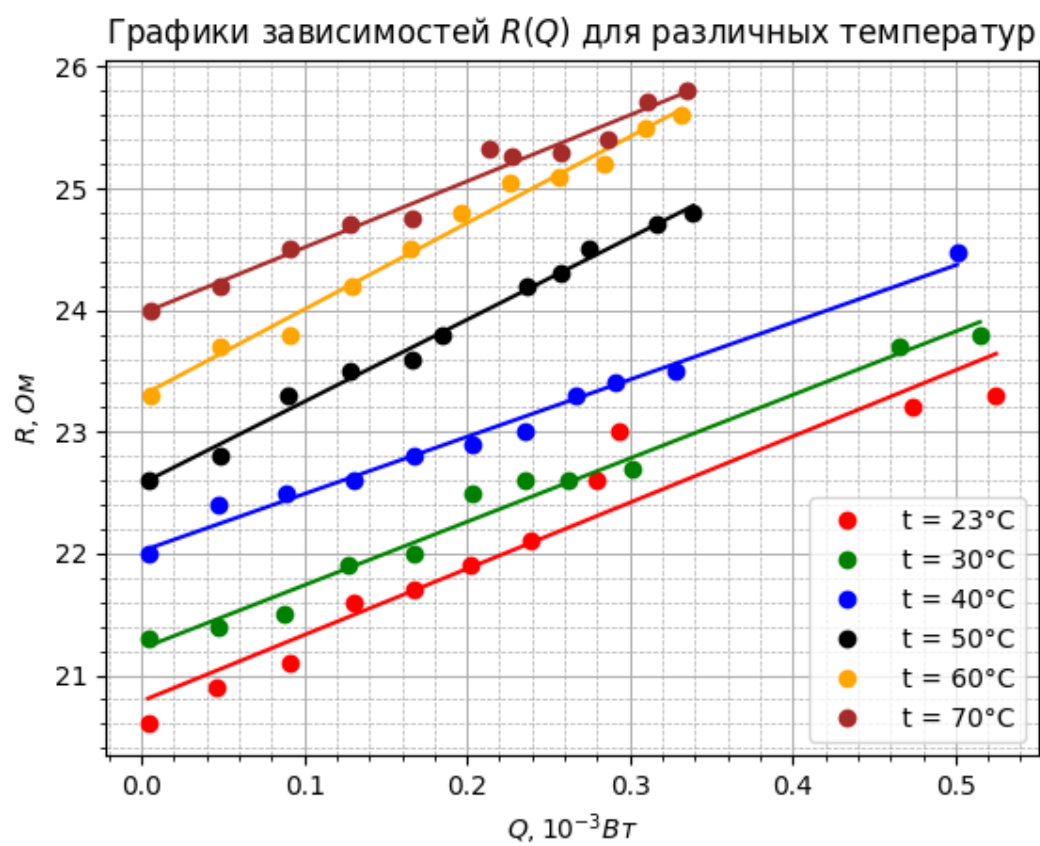


Рис. 2: Графики зависимостей  $R(Q)$  для различных температур

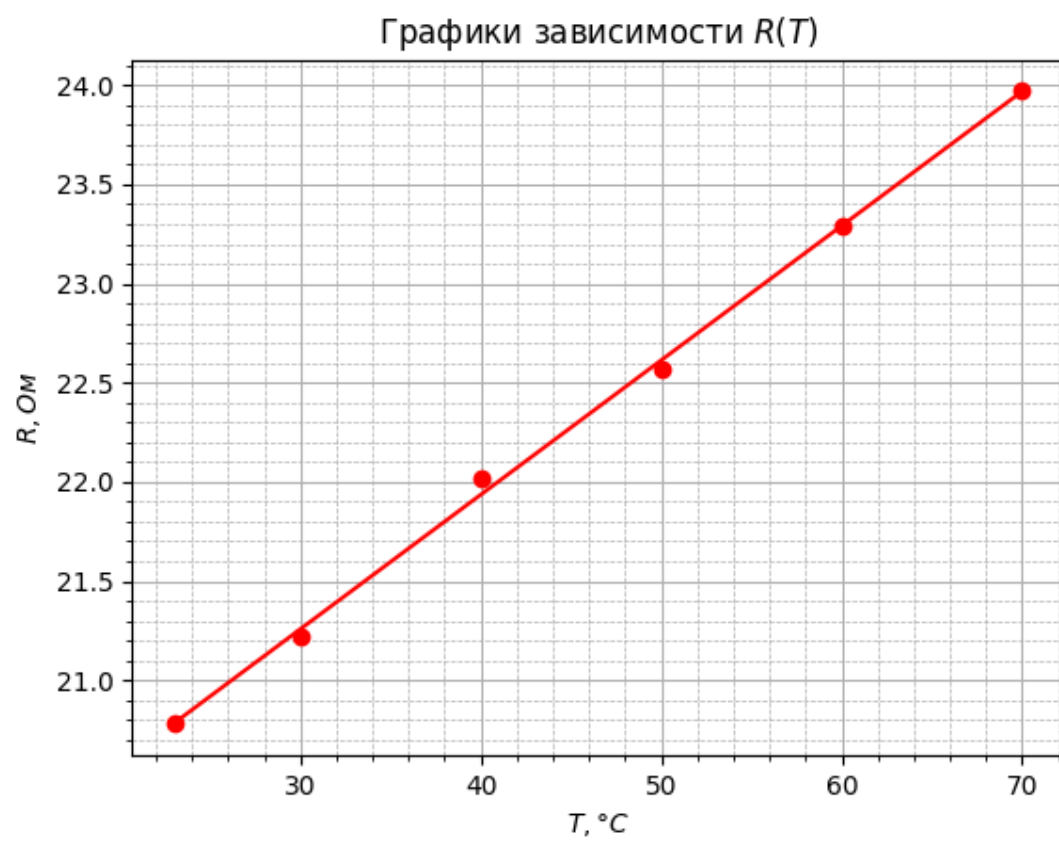


Рис. 3: Графики зависимости  $R(T)$



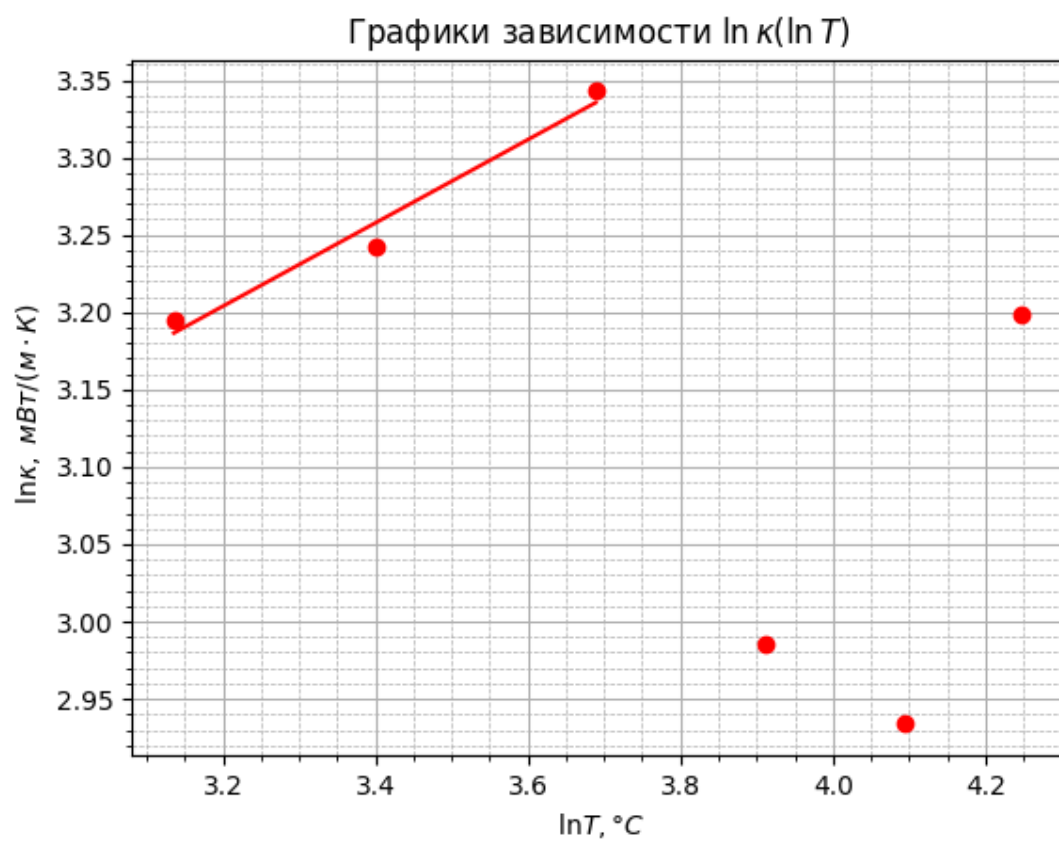


Рис. 4: Графики зависимости  $\ln \kappa(\ln T)$