

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

Калашников Михаил, Б03-205

**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.

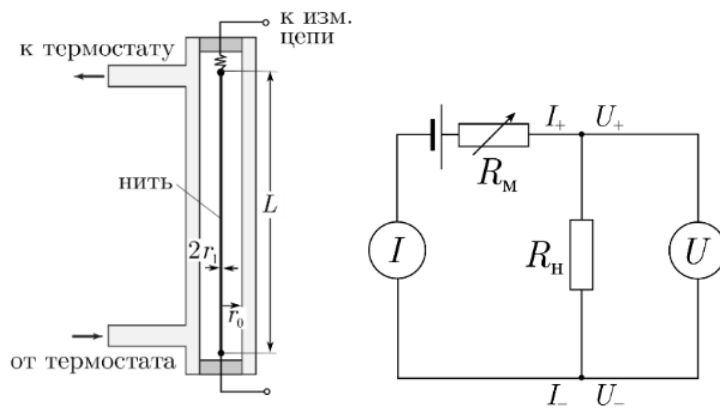


Рис. 1: Схемы установки и цепи

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.

### 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  $R_m$ . Занесем данные в таблицу 2. Значения сопротивления  $R_m$  были предварительно рассчитаны таким образом, чтобы мощность, выделяемая проволокой, возрастала монотонно в диапазоне от 0 до  $Q_{\text{макс}}$  (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. Заметим, что на прямую ложатся только первые три точки, поэтому в дальнейшем будем использовать только их. Получим зависимость  $R(T)$ . Рассчитаем температурный коэффициент сопротивления нити  $\alpha$  по формуле:

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

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 и 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:

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

$$\alpha = 0,49 \pm 0,01 \frac{10^{-3}}{\text{К}}$$

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  $\beta$ :

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

$$\beta = 0.42 \pm 0.06$$

## 6. Вывод

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

## 7. Приложения

$\eta$	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$R_{\text{м}}, \text{ Ом}$	180	43,2	24,7	16,5	11,6	8,3	5,8	3,9	2,4	1,1	0

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

$t, ^\circ C$	$\eta$	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
27,9	$I, \text{ мА}$	16,596	48,935	66,188	78,235	87,671	95,289	101,92	107,55	112,36	116,81	142,48
	$U, \text{ В}$	0,3461	1,0326	1,4123	1,6857	1,9055	2,0872	02,249	02,389	02,511	2,6252	3,3196
35,0	$I, \text{ мА}$	16,556	48,879	66,099	78,121	87,537	95,137	101,76	107,37	112,16	116,60	142,20
	$U, \text{ В}$	0,3465	1,0349	1,4147	1,6879	1,9075	2,0889	2,2504	02,390	2,5117	2,6262	3,3191
40,0	$I, \text{ мА}$	16,549	48,836	66,013	78,020	87,403	97,523	101,58	107,19	111,97	116,41	141,95
	$U, \text{ В}$	0,3472	1,0364	1,4163	1,6894	1,9089	2,1518	2,2512	2,3910	02,512	2,6265	3,3183
45,0	$I, \text{ мА}$	16,681	48,827	66,010	78,002	87,397	94,983	101,59	107,21	112,00	116,45	141,99
	$U, \text{ В}$	0,3483	1,0374	1,4174	1,6906	1,9101	2,0916	2,2528	2,3926	2,5138	2,6282	3,3203
50,0	$I, \text{ мА}$	16,591	48,861	66,055	78,056	87,745	95,045	101,65	107,28	112,07	116,52	142,09
	$U, \text{ В}$	0,3483	1,0376	1,4177	1,6910	1,9106	2,0920	2,2532	2,3931	02,514	2,6288	3,3213
55,1	$I, \text{ мА}$	16,593	48,872	66,078	78,088	87,494	95,092	101,70	107,33	112,13	116,59	142,18
	$U, \text{ В}$	0,3481	1,0372	1,4173	1,6906	1,9102	2,0917	2,2529	2,3927	2,5141	2,6285	3,3214
60,1	$I, \text{ мА}$	16,594	48,887	66,103	78,123	87,539	95,143	101,76	107,40	112,20	116,65	142,27
	$U, \text{ В}$	0,3478	1,0363	1,4163	1,6896	1,9093	2,0908	2,2522	2,3921	2,5134	2,6280	3,3215

Таблица 2: Данные, полученные в ходе выполнения работы

$t, ^\circ C$	27,9	35,0	40,0	45,0	50,0	55,1	60,1
$R_0, \text{ Ом}$	20,85	20,92	20,97	20,96	20,97	20,97	20,95
$\frac{dR}{dQ}, \text{ Ом/Дж}$	5,26	5,20	5,17	5,26	5,14	5,12	5,13
$\frac{dQ}{dT}, \text{ мДж/К}$	1,92	1,94	1,95	-	-	-	-
$\kappa, \text{ мкВт/(м} \cdot \text{К)}$	3,8	3,8	3,8	-	-	-	-

Таблица 3: Значения  $R_0$  и  $\frac{dR}{dQ}$  для различных температур

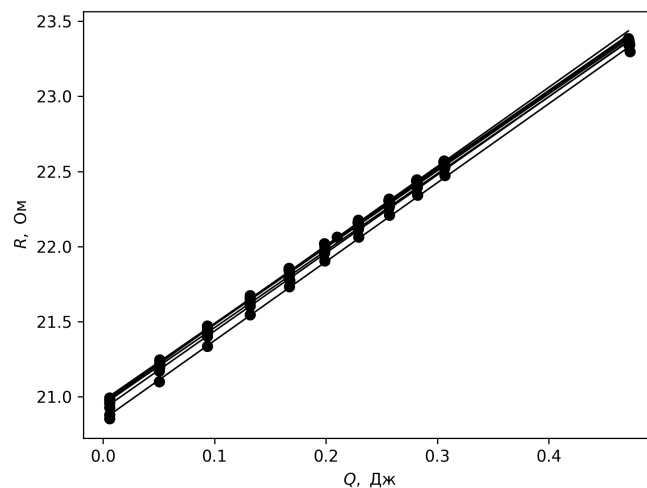


Рис. 2: Графики зависимостей  $R(Q)$  для различных температур

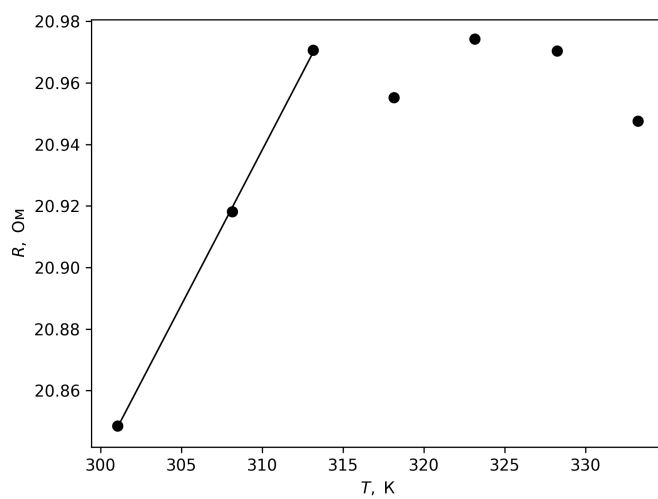


Рис. 3: Графики зависимости  $R(T)$

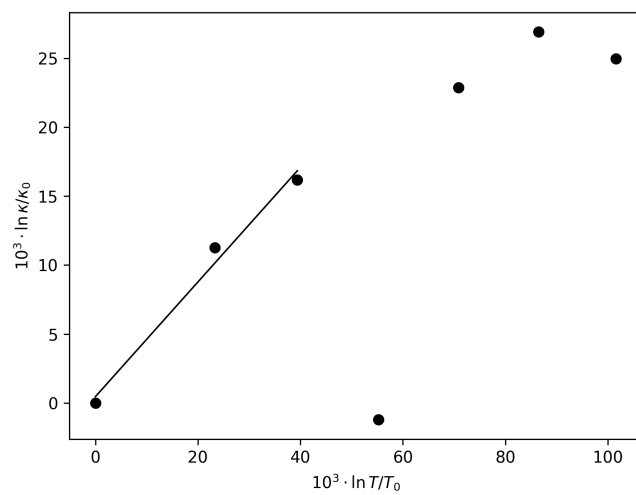


Рис. 4: Графики зависимости  $\ln \kappa(\ln T)$ , отнормированный таким образом, что первая точка совпадает с точкой  $(0, 0)$