

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 2.2.3

Измерение теплопроводности воздуха при атмосферном
давлении

Выполнил:

Гисич Арсений

Б03-109

Долгопрудный

2022

1 Аннотация

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

2 Теоретические сведения

Теплопроводность — это процесс передачи тепловой энергии от нагретых частей системы к холодным за счёт хаотического движения частиц среды (молекул, атомов и т.п.). 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 $\vec{q} [\frac{Вт}{м^2}]$ (количество теплоты, переносимое через единичную площадку в единицу времени) пропорциональна градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\kappa \cdot \nabla T,$$

где κ — коэффициент теплопроводности.

$$\kappa \sim \lambda \vec{v} \cdot n c_v,$$

где λ — длина свободного пробега молекул газа, \vec{v} — средняя скорость их теплового движения, n — концентрация (объёмная плотность) газа.

Решая дифференциальное уравнение для цилиндрического случая получаем:

$$Q = \frac{2\pi L}{\ln \frac{r_0}{r_1}} \kappa \cdot \Delta T. \quad (1)$$

3 Методика измерений

На оси полой цилиндрической трубки с внутренним диаметром $2r_0 = (1,00 \pm 0,01) см$ размещена металлическая нить диаметром $2r_1 = (0,055 \pm 0,005) мм$ и длиной $L = (365 \pm 2) мм$ (материал нити и точные геометрические размеры указаны в техническом описании установки). Полость трубки заполнена воздухом (полость через небольшое отверстие сообщается с атмосферой). Стенки трубки помещены в кожух, через которых пропускается вода из термостата, так что их температура поддерживается постоянной. Для предотвращения конвекции трубка расположена вертикально.

Металлическая нить служит как источником тепла, так и датчиком температуры (термометром сопротивления). По пропускаемому через нить постоянному току I и напряжению U на ней вычисляется мощность нагрева по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = UI,$$

и сопротивление по закону Ома:

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

Сопротивление нити является однозначной функцией её температуры $R(t)$. Для большинства металлов относительное изменение сопротивления из-за нагрева невелико: при изменении температуры на 1 градус относительное изменение сопротивления нити может со-

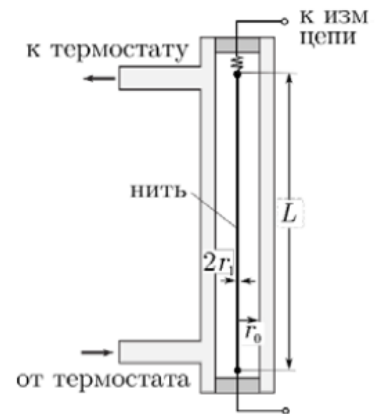


Рис. 1: Схема установки

ставлять приблизительно от 0,2 % до 0,6 % (в зависимости от её материала). Следовательно, измерение R важно провести с высокой точностью.

Схема предусматривает использование одного вольтметра и эталонного сопротивления $R_{\text{э}} \sim 10 \text{ Ом}$, включённого последовательно с нитью. В положении переключателя 2 вольтметр измеряет напряжение на нити, а в положении 1 — напряжения на $R_{\text{э}}$, пропорциональное току через нить. Для исключения влияния контактов и подводящих проводов эталонное сопротивление $R_{\text{э}}$ также необходимо подключать в цепь по четырёхпроводной схеме. Ток в цепи в обеих схемах регулируется с помощью реостата или магазина сопротивлений $R_{\text{м}}$, включённого последовательно с источником напряжения.

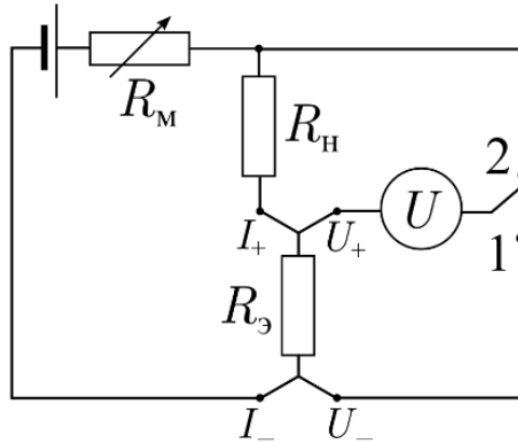


Рис. 2: Электрическая схема измерения сопротивления нити и мощности нагрева

В исследуемом интервале температур (20–70 °C) зависимость сопротивления от температуры можно с хорошей точностью аппроксимировать линейной функцией:

$$R(t) = R_{273} \cdot (1 + \alpha t),$$

где t — температур в [°C], R_{273} — сопротивление нити при температуре 20 °C и $\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dT}$ — температурный коэффициент сопротивления материала.

4 Используемое оборудование

1. цилиндрическая колба с натянутой по оси нитью;
2. термостат;
3. источник питания постоянного тока;
4. амперметр, вольтметр (цифровые мультиметры), $\delta_A = 0,005 \text{ А}$;
5. эталонное сопротивление;
6. источник постоянного напряжения;
7. магазин сопротивлений;

5 Результаты измерений и обработка данных

Начальные условия:

$$T = 23,1 \pm 0,1 \text{ °C}$$

Проведём предварительные расчёты параметров опыта. Принимая $\Delta t_{max} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\kappa \sim 25 \text{ мВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, получаем

$$Q = 110 \text{ мВт}; \quad I = \sqrt{\frac{Q}{R}} = 105 \text{ мА}.$$

Результаты измерений $R(Q)$ представлены в таб. 1-4.

$Q, 10^{-6} \text{ Дж}$	$\sigma_Q, 10^{-6} \text{ Дж}$	$R, \text{ Ом}$	$\sigma_R, \text{ Ом}$
0,0143	0,0001	11,00	0,01
0,0174	0,0001	11,03	0,01
0,0211	0,0001	11,05	0,01
0,0268	0,0001	11,06	0,01
0,0348	0,0001	11,11	0,01
0,0471	0,0001	11,14	0,01
0,0670	0,0001	11,16	0,01

Таблица 1: $T_1 = 23,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$Q, 10^{-6} \text{ Дж}$	$\sigma_Q, 10^{-6} \text{ Дж}$	$R, \text{ Ом}$	$\sigma_R, \text{ Ом}$
0,0149	0,0001	11,09	0,01
0,0180	0,0001	11,14	0,01
0,0221	0,0001	11,14	0,01
0,0280	0,0001	11,20	0,01
0,0363	0,0001	11,19	0,01
0,0491	0,0001	11,22	0,01
0,0703	0,0001	11,27	0,01

Таблица 2: $T_2 = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$Q, 10^{-6} \text{ Дж}$	$\sigma_Q, 10^{-6} \text{ Дж}$	$R, \text{ Ом}$	$\sigma_R, \text{ Ом}$
0,0153	0,0001	11,51	0,01
0,0185	0,0001	11,52	0,01
0,0229	0,0001	11,57	0,01
0,0288	0,0001	11,58	0,01
0,0379	0,0001	11,67	0,01
0,0507	0,0001	11,68	0,01
0,0724	0,0001	11,69	0,01

Таблица 3: $T_3 = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$Q, 10^{-6} \text{ Дж}$	$\sigma_Q, 10^{-6} \text{ Дж}$	$R, \text{ Ом}$	$\sigma_R, \text{ Ом}$
0,0206	0,0001	12,65	0,01
0,0254	0,0001	12,76	0,01
0,0321	0,0001	12,77	0,01
0,0419	0,0001	12,77	0,01
0,0569	0,0001	12,79	0,01
0,0819	0,0001	12,80	0,01
0,1280	0,0001	12,80	0,01

Таблица 4: $T_4 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$

Полученная зависимость R от Q представлена на рис. 3.

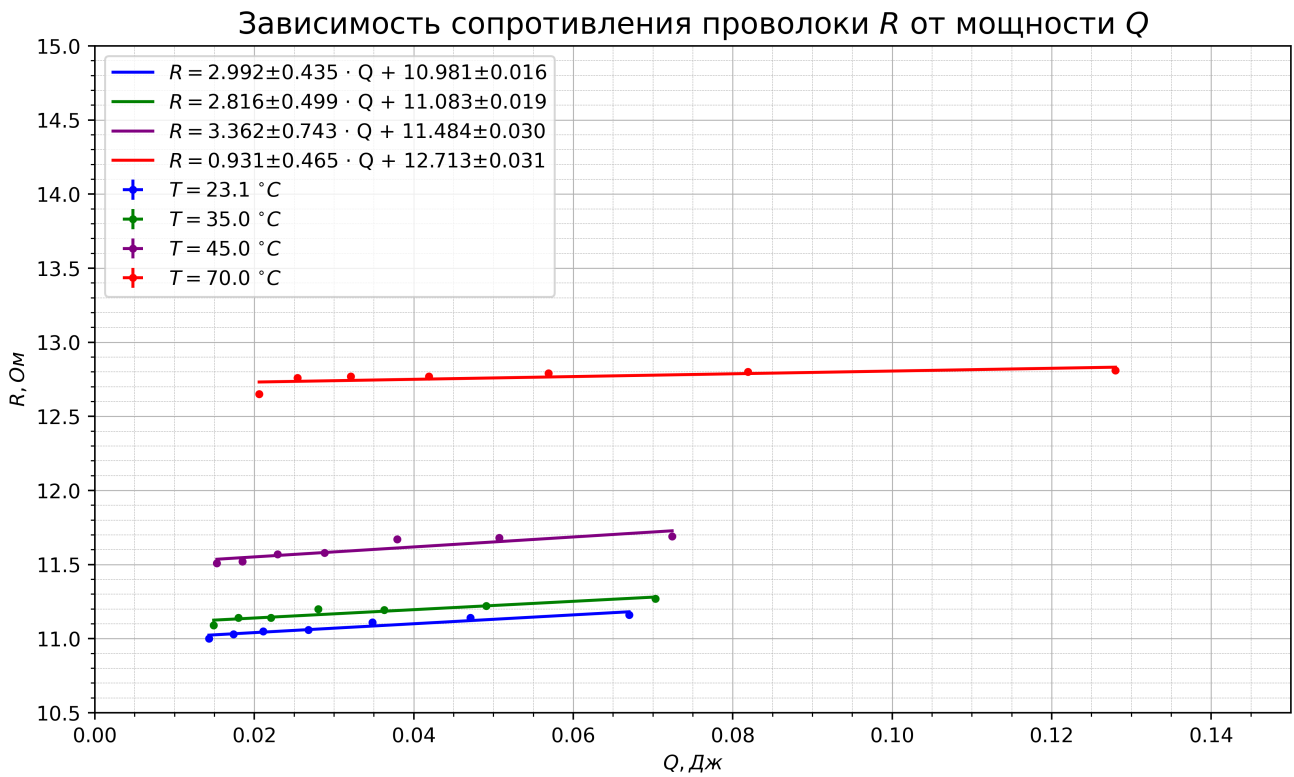


Рис. 3:

Полученная зависимость R_0 от T представлена на рис. 4.

Полученное значение температурного коэффициента сопротивления

$$\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dT} = 0,0047 \pm 0,0008 \text{ K}^{-1}.$$

Полученные коэффициенты теплопроводности κ представлены в таб. 5.

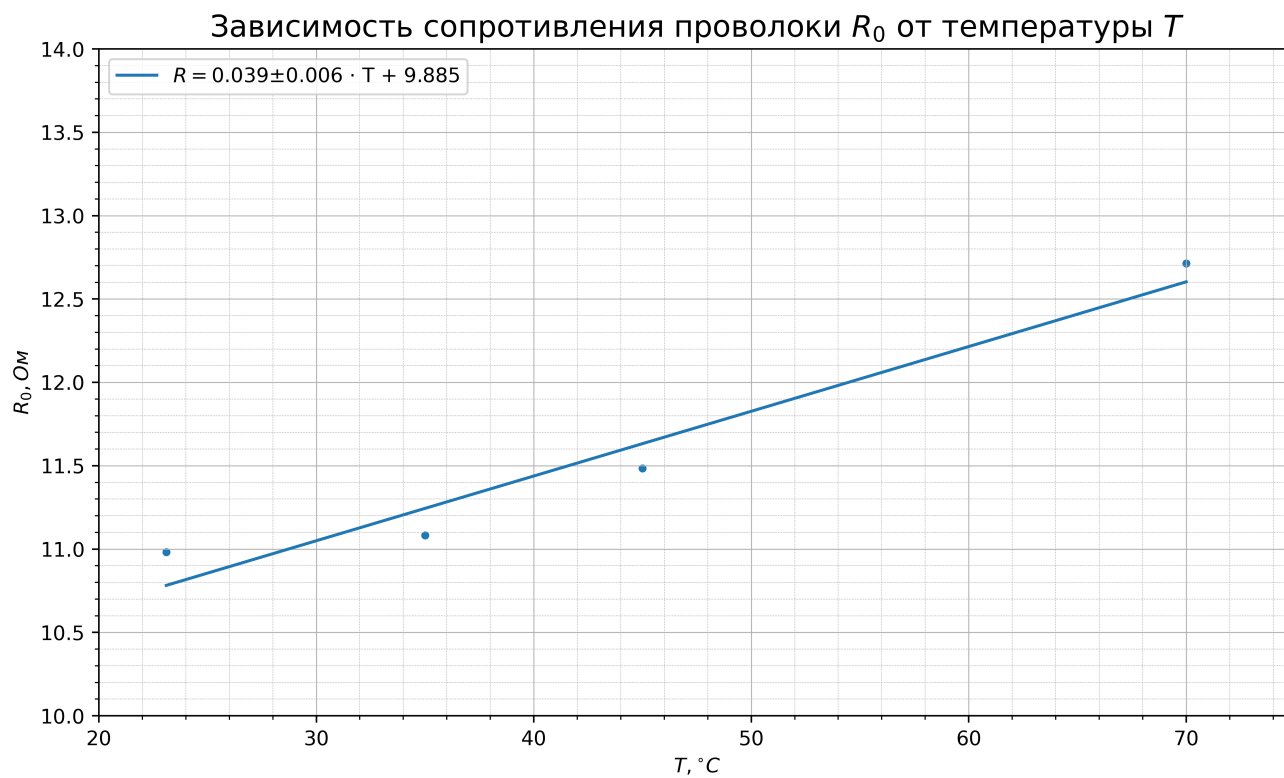


Рис. 4:

$T, ^\circ\text{C}$	dR/dT	dR/dQ	$dQ/\Delta T$	$\kappa, \text{Bm}/(\text{K} \cdot \text{m})$
23,1	$0,039 \pm 0,006$	$2,992 \pm 0,435$	$0,013 \pm 0,003$	$0,029 \pm 0,006$
35	$0,039 \pm 0,006$	$2,816 \pm 0,499$	$0,014 \pm 0,003$	$0,031 \pm 0,007$
45	$0,039 \pm 0,006$	$3,362 \pm 0,743$	$0,012 \pm 0,003$	$0,026 \pm 0,007$
70	$0,039 \pm 0,006$	$0,931 \pm 0,465$	$0,022 \pm 0,075$	$0,049 \pm 0,015$

Таблица 5: Результаты вычислений

Полученная зависимость κ от T представленно на рис. 5.

Полученная зависимость $\ln \kappa$ от $\ln T$ представленно на рис. 6.

Полученное значение

$$\beta = 3,511 \pm 1,964.$$

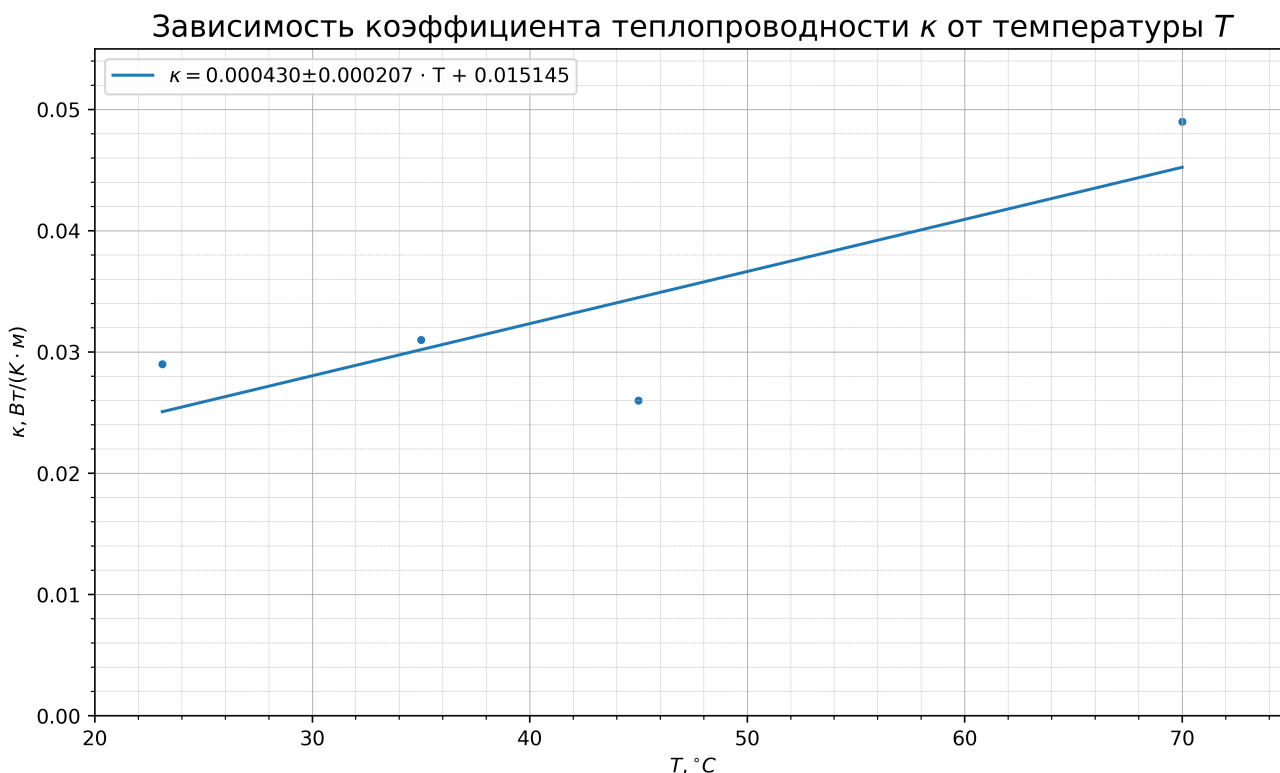


Рис. 5:

6 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе исследовалась зависимость сопротивления проволоки от мощности выделяющегося на ней тепла. По результатам измерений для каждой температуры определялся коэффициент теплопроводности воздуха. Полученная зависимость представлена на рис. 5. Полученные значения для всех температур, кроме 70 °C, согласуются с табличными данными – $\kappa = 0,025 \div 0,030 \text{ Вт/(К} \cdot \text{м)}$. Используемый в работе метод измерений позволяет достичь относительной точности результатов в 20%. Основной вклад в погрешность вносит погрешность определения коэффициентов линейной зависимости.

Также в данной работе был определён температурный коэффициент сопротивления молибдена:

$$\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dT} = 0,0047 \pm 0,0008 \text{ K}^{-1}.$$

Табличное значение для данного коэффициента – $0,0049 \text{ K}^{-1}$, что согласуется с полученным результатом.

В простейшей модели твёрдых шариков коэффициент теплопроводности пропорционален корню абсолютной температуры $\kappa \propto T^{\frac{1}{2}}$. Экспериментальное значение показателя степени

$$\beta = 3,511 \pm 1,964,$$

что слабо согласуется с теорией. Во-первых, это может быть связано с неучтенными тепловыми потерями через основания цилиндра. Во-вторых, количество экспериментальных точек достаточно мало. В-третьих, при выводе формулы (1) пренебрегалось зависимостью теплопроводности от температуры, поэтому она справедлива только при $\Delta T \ll T$. И

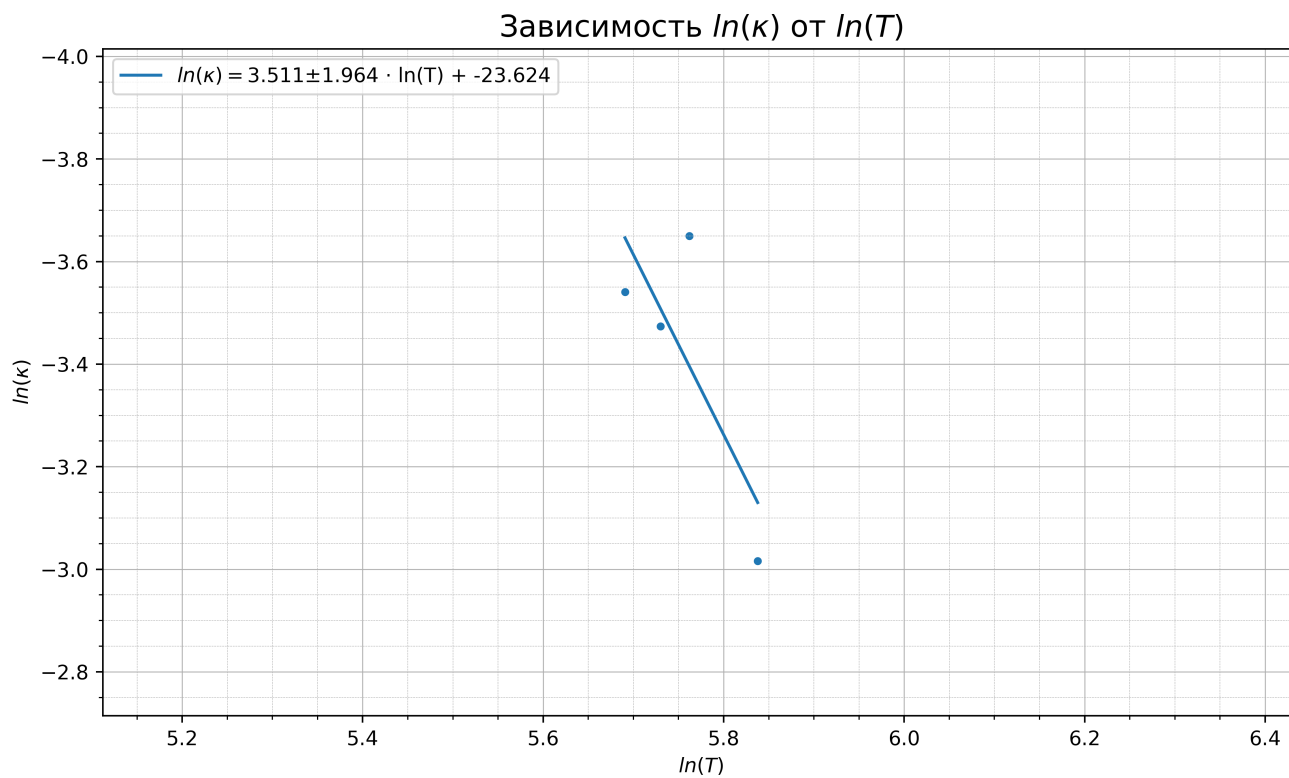


Рис. 6:

наконец, возникновение термо-ЭДС повлияло на точность вольтметра. Для получения более точного результата необходимо увеличить диапазон рабочих температур, количество экспериментальных точек и уменьшить шаг изменения температуры.