

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ФИЗИКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ им. ЛАНДАУ

Лабораторная работа № 2.2.3  
**Измерение теплопроводности воздуха при атмосферном  
давлении**

Плотникова Анастасия Александровна  
Группа Б02-406

Долгопрудный, 2025 г.

### Цель работы:

измерить коэффициент теплопроводности воздуха при атмосферном давлении в зависимости от температуры

### В работе используются:

цилиндрическая колба с натянутой по оси платиновой нитью;

термостат Witeg WCR-22 (поддержание:  $\pm 0.1$ , K);

вольтметр В7-78/1:

$\pm(0.009U + 0.001)/100$  В в диапазоне 1 В;

$\pm(0.012U + 0.002)/100$  В в диапазоне 10 В;

амперметр В7-78/3:

$\pm(0.05I + 1)/100$  мА в диапазоне 100 мА;

эталонное сопротивление;

источник постоянного напряжения;

магазин сопротивлений.

## Теоретическая справка

**Теплопроводность** — это процесс передачи тепловой энергии от нагретых частей системы к холодным за счёт хаотического движения частиц среды.

**Закон Фурье.** Плотность потока энергии  $\vec{q}$  (Вт/м<sup>2</sup>) — количество теплоты, переносимое через единичную площадку в единицу времени — пропорциональна градиенту температуры  $\nabla T$ :

$$\vec{q} = -\kappa \cdot \nabla T, \quad (1)$$

где  $\kappa$  (Вт/(м·К)) — коэффициент теплопроводности.

Оценка для коэффициента теплопроводности газов:

$$\kappa \sim \lambda \bar{v} \cdot n c_V, \quad (2)$$

где:

$\lambda$  — длина свободного пробега молекул газа,

$\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$  — средняя скорость теплового движения молекул,

$n$  — концентрация (объёмная плотность) газа,

$c_V = \frac{i}{2} k_B$  — теплоёмкость при постоянном объёме на одну молекулу,

$i$  — эффективное число степеней свободы молекулы.

Формула (2) даёт лишь оценку по порядку величины и правильную функциональную зависимость. В учебной литературе часто приводится формула с численным коэффициентом  $\frac{1}{3}$ . Но это не более, чем оценка.

$$\kappa = \frac{1}{3} \lambda \bar{v} \cdot n c_V.$$

Длина свободного пробега может быть оценена как  $\lambda = \frac{1}{n\sigma}$ , где  $\sigma$  — эффективное сечение столкновений молекул друг с другом.

Тогда из (2) видно, что коэффициент теплопроводности газа не зависит от плотности газа и определяется только его температурой. В простейшей модели твёрдых

шариков  $\sigma = \text{const}$ , и коэффициент теплопроводности пропорционален корню из абсолютной температуры:

$$\kappa \propto \frac{\bar{v}}{n} \propto \sqrt{T}.$$

На практике эффективное сечение  $\sigma(T)$  следует считать медленно убывающей функцией  $T$ , поскольку при увеличении  $T$  молекулы движутся быстрее и проводят меньше времени во интенсивном взаимном взаимодействии, что снижает вероятность эффективного столкновения.

Рассмотрим стационарную теплопередачу от тонкой нити (радиус  $r_1$ , длина  $L$ ), расположенной вдоль оси цилиндра (радиус  $r_0$ ), к его стенкам с постоянной температурой  $T_0$ . В нити выделяется мощность  $Q$ . При  $L \gg r_0$  теплоотвод через торцы пренебрежимо мал, поток тепла направлен радиально, параметры зависят только от  $r$ .

Скалярная форма закона Фурье:

$$q = -\kappa \frac{dT}{dr}. \quad (3)$$

Полный поток через цилиндрическую поверхность:

$$Q = -2\pi r L \cdot \kappa \frac{dT}{dr} = \text{const}. \quad (4)$$

При малом перепаде температур  $\Delta T = T_1 - T_0$  и  $\kappa \approx \kappa(T_0)$ , интегрирование даёт:

$$Q = \frac{2\pi L \kappa \Delta T}{\ln(r_0/r_1)} \quad (5)$$

Видно, что закон Ньютона выполняется, то есть поток тепла через систему пропорционален разности температур в ней.

## Оценка времени установления равновесия

При изменении температуры или мощности нагрева система переходит в новое стационарное состояние за конечное время  $\tau$ . Оценим его по порядку величины для плоского слоя толщиной  $a$  и площадью  $S$ , заполненного газом при постоянном давлении.

Температурный скачок  $\Delta T$  вызывает тепловой поток:

$$q \sim \kappa \frac{\Delta T}{a}.$$

Для нагрева слоя на  $\Delta T$  требуется тепло:

$$Q_{\text{необх.}} = n S a \cdot c_P \Delta T.$$

Поступившее за время  $\tau$  тепло:

$$Q = q S \tau = \kappa \frac{\Delta T}{a} S \tau.$$

Приравнявая, получаем оценку:

$$\tau \sim \frac{a^2}{\chi}, \quad \text{где} \quad \chi = \frac{\kappa}{n c_P}.$$

Величина  $\chi$  — температуропроводность, определяет скорость теплового выравнивания. Для воздуха при Н.У.  $\chi \sim 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$ , при  $a \sim 1 \text{ см}$  получаем  $\tau \sim 5 \text{ с}$ .

## Пределы применимости теории

Закон Фурье может нарушаться, если характерные размеры задачи сравнимы с длиной свободного пробега  $\lambda$ . Тогда возникает, например, температурный скачок между нитью и газом. В данной работе этим можно пренебречь, так как при атмосферном давлении:

$$\lambda \sim 10^{-5} \text{ см} \ll r_{\text{нити}}.$$

Также возможны и другие механизмы теплопередачи: конвекция и излучение.

**Конвекция:** подавляется вертикальной ориентацией установки (градиент температуры горизонтален).

**Излучение:** становится заметным при сильном перегреве нити. Мощность излучения по закону Стефана–Больцмана:

$$Q_{\text{изл}} = \epsilon \sigma_S S (T_1^4 - T_0^4) \approx 4\epsilon \sigma_S S T_0^3 \Delta T,$$

где  $\sigma_S = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ,  $\epsilon \sim 0,1 \div 0,2$  — коэффициент черноты для полированных металлов. В условиях опыта вклад излучения мал.

## Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рисунке (1).

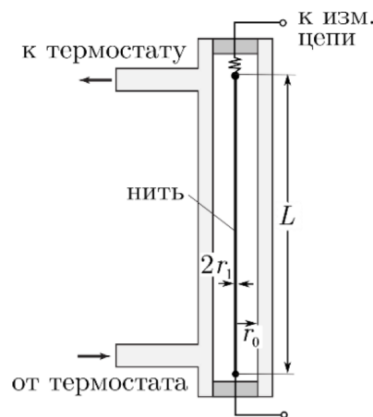


Рис. 1: Схема установки

Внутри вертикально расположенной полой цилиндрической трубки диаметром  $2r_0 \sim 1 \text{ см}$  размещена металлическая нить диаметром  $2r_1 \sim 0,05 \text{ мм}$  и длиной  $L \sim 40 \text{ см}$ . Трубка заполнена воздухом и соединена с атмосферой. Стенки охлаждаются водой из термостата, поддерживающего температуру  $t_0$ . Вертикальное расположение исключает конвекцию.

Нить служит источником тепла и термометром сопротивления. По закону Джоуля–Ленца:

$$Q = UI, \quad R = \frac{U}{I}.$$

Сопротивление  $R(t)$  однозначно связано с температурой. При  $Q \rightarrow 0$  температура нити  $t_1 \rightarrow t_0$ , что позволяет определить зависимость  $R(t)$ . Альтернативно, используется табличная зависимость удельного сопротивления от температуры.

Относительное изменение сопротивления при  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$  обычно составляет  $0.2\% \pm 0.6\%$ , поэтому измерения требуют высокой точности (погрешность менее  $0,1\%$ ).

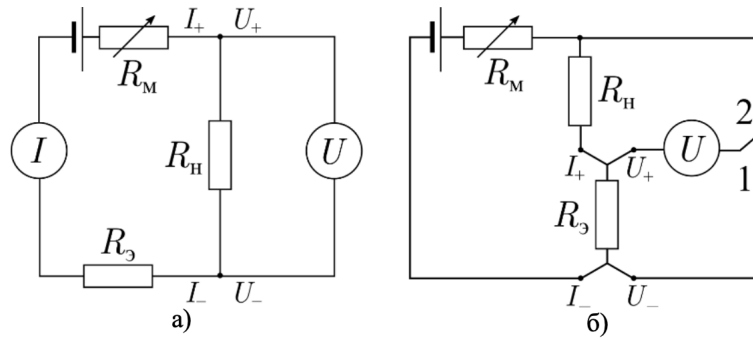


Рис. 2: Варианты электрических схем измерения сопротивления нити и мощности нагрева: а) с двумя мультиметрами, б) с одним вольтметром и эталонным сопротивлением

На рисунке (2) приведены два варианта электрической схемы установки.

В обеих схемах ток регулируется реостатом  $R_M$ , подключённым последовательно с источником питания.

## Методика измерений

Измерение сопротивления нити с током приводит к самонагреву:

$$Q = I^2 R.$$

Для исключения систематической ошибки используют метод экстраполяции: строится нагрузочная кривая  $R(Q)$ , и по её пересечению с осью  $Q = 0$  находят сопротивление  $R_0$ , соответствующее температуре окружающей среды  $t_0$ .

При этом можно аппроксимировать зависимость:

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

где  $R_{273}$  — сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления:

$$\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dt}.$$

Измерения  $R(Q)$  при разных  $t_0$  дают  $R(t)$ . По наклонам кривых и формуле (??) определяется теплопроводность  $\kappa$ .

## Ход работы

### I. Подготовка к эксперименту

1. Проведём предварительные расчёты параметров опыта. Для этого зафиксируем параметры установки.

Нить платиновая.

$R_0^{Pt} \approx 20 \Omega$  — сопротивление нити при комнатной температуре;

$2r_0 = (0.7 \pm 0.1) \text{ см} = (7 \pm 1) \text{ мм}$  — внутренний диаметр цилиндрической трубки;

$2r_1 = (0.05 \pm 0.01) \text{ мм}$  — диаметр платиновой нити;

$L \approx 0.40 \text{ м}$  — длина нити;

$\Delta T = (30 \pm 1) \text{ K}$  — максимальный перегрев нити относительно термостата при

напряжении источника питания;

$\kappa \approx 25 \frac{\text{мВт}}{\text{м}\cdot\text{К}} = 25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$  — коэффициент теплопроводности воздуха (для оценки максимальной мощности нагрева).

Приняв максимально допустимый перегрев нити относительно термостата равным  $\Delta t_{\text{max}} = 30^\circ\text{C}$ , оценим максимальную мощность нагрева  $Q_{\text{max}}$  [мВт] (см. формулу (5)), которую следует подавать на нить. Для оценки примем коэффициент теплопроводности воздуха равным  $\kappa \sim 25 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

$$Q_{\text{max}} = \frac{2\pi L\kappa\Delta T}{\ln(r_0/r_1)} = \frac{2\pi \cdot 0.40 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 30}{\ln(7/0.05)} = 0.381 \text{ Вт}$$

- По вычисленной мощности и приближенному значению сопротивления нити  $R_{\text{н}}$  (см. техническое описание установки), определим соответствующие значения максимального тока  $I_{\text{max}}$  и максимального напряжения  $U_{\text{max}}$  на ней.

$$I_{\text{max}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{max}}}{R_{\text{н}}}} \approx 138 \text{ мА}$$

$$U_{\text{max}} = \sqrt{Q_{\text{max}} R_{\text{н}}} \approx 2.76 \text{ В}$$

- Перед переходом к измерениям покажем результаты расчёта преподавателю. При дальнейшей работе во избежание перегрева нити не допустим превышения данных параметров.
- Во избежание перегорания нити не увеличиваем напряжение на источнике питания  $\mathcal{E}$  выше критического!

## 2. Подготовим экспериментальную установку.

- Проверим, что измерительная цепь соответствует схеме рис. 3(а).
- На магазине сопротивлений установим такое сопротивление  $R_m$ , чтобы ток в цепи при её замыкании был минимален ( $R_m \geq 90 \text{ кОм}$ ).
- Включим вольтметр и амперметр и настроим режимы их работы.
- Включим источник питания; проверим, что он работает в режиме источника напряжения, и что напряжение на нём не превышает максимально допустимое ( $U = 3.8 \text{ В}$ ).
- Включим термостат и убедимся, что вода в нём находится при комнатной температуре  $t = (23.0 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ ; при необходимости нагреем/охладим термостат.

## II. Проведение измерений

3. При фиксированной температуре термостата измерим зависимость сопротивления нити  $R_n = \frac{U}{I}$  от подаваемой на неё мощности  $Q = UI$  — нагрузочную кривую  $R_n(Q)$ .

$$Q = UI = I^2 R_n = \frac{\mathcal{E}^2 R_n}{(R_n + R_m^2)}$$

$$R_m = \mathcal{E} \sqrt{\frac{R_n}{Q_n}} - R_n$$

- Измерения проведём для 9–10 значений тока  $I$  через нить от 0 до  $I_{\text{max}}$ .

- Постараемся подбирать такие значения сопротивления магазина  $R_m$ , чтобы мощность нагрева нити  $Q = I^2 R_n$  возрастала приблизительно равномерно в диапазоне от 0 до  $Q_{\max}$ .

Во время работы мы воспользовались неправильной формулой и получили невразумительные результаты. Из-за чего напряжения подбирались на глаз, чтобы мощность возрастала примерно равномерно. И, разумеется, с ограничением по току, чтобы избежать перегорания нити.

$Q$ , мВт	40	80	120	160	200	240	280	320	360	381
$R_m$ , $\Omega$	65	40	29	22	18	15	12	10	8.3	7.5

Таблица 1: Значения сопротивлений магазина и предполагаемые мощности

- Ток следует наращивать монотонно, постепенно уменьшая сопротивление магазина сопротивлений  $R_m$ . Перед фиксацией показаний дождёмся установления теплового равновесия (время ожидания  $\sim 30$  с): показания мультиметров должны быть стационарны (флуктуировать вблизи постоянного значения).

При измерениях будем не только записывать показания мультиметров (напряжение  $U$  и ток  $I$ ), но и сразу вычислять  $R_n$  и  $Q$ . Погрелности  $R_n$  и  $Q$  рассчитаем по формуле  $\varepsilon_Q = \varepsilon_{R_n} = \sqrt{\varepsilon_I^2 + \varepsilon_U^2}$ .

Результаты приведены в таблице Excel. Точек достаточно много, поэтому размещение их в отчете я считаю нецелесообразным. Вместо этого визуализируем данные на графике (3).

- В процессе измерений контролируем постоянство температуры термостата. Если за время измерений температура термостата изменилась более чем на  $0,1^\circ\text{C}$ , опыт будем переделывать.
4. По окончании измерений нагрузочной кривой установим минимальный ток через нить, переведя значение магазина сопротивлений на  $R_m \geq 90$  кОм. В дальнейшем будем возвращать магазин сопротивлений в это положение после каждого измерения нагрузочной кривой.
  5. Проведём измерения нагрузочных кривых согласно п. 3–4 для 5–7 температур термостата в диапазоне от комнатной до  $80^\circ\text{C}$  с интервалом в  $10^\circ\text{C}$ . Приступим к измерениям при новой температуре лишь после установления стационарного состояния (время ожидания не менее 15 минут).
  6. После завершения измерений выключим блок питания и цифровые мультиметры. На магазине сопротивлений (реостате)  $R_m$  установим максимальное сопротивление ( $\geq 90$  кОм). Поставим термостат на охлаждение до комнатной температуры.

### III. Обработка результатов измерений

7. Для каждой температуры термостата построим график зависимости сопротивления нити от мощности  $R(Q)$ .

Убедимся в линейности полученных зависимостей. Проведём наилучшие прямые методом МНК и определим точки их пересечения с осью ординат  $R_0$  (при

$Q \rightarrow 0$  температура нити совпадает с температурой термостата) и угловые коэффициенты наклона  $\frac{dR}{dQ}$ .

Для этого воспользуемся формулами.

$$k = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = \frac{\langle QR \rangle - \langle Q \rangle \langle R \rangle}{\langle Q^2 \rangle - \langle Q \rangle^2}$$

$$b = \langle y \rangle - k \langle x \rangle = \langle R \rangle - k \langle Q \rangle$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - k^2} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle R^2 \rangle - \langle R \rangle^2}{\langle Q^2 \rangle - \langle Q \rangle^2} - k^2}$$

$$\sigma_b = \sigma_k \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = \sigma_k \sqrt{\langle Q^2 \rangle - \langle Q \rangle^2}$$

Рассчитанные коэффициенты и их погрешности представлены в таблице (2) и на графике (3), где  $a$  соответствует угловому коэффициенту, а  $b$  — свободному.

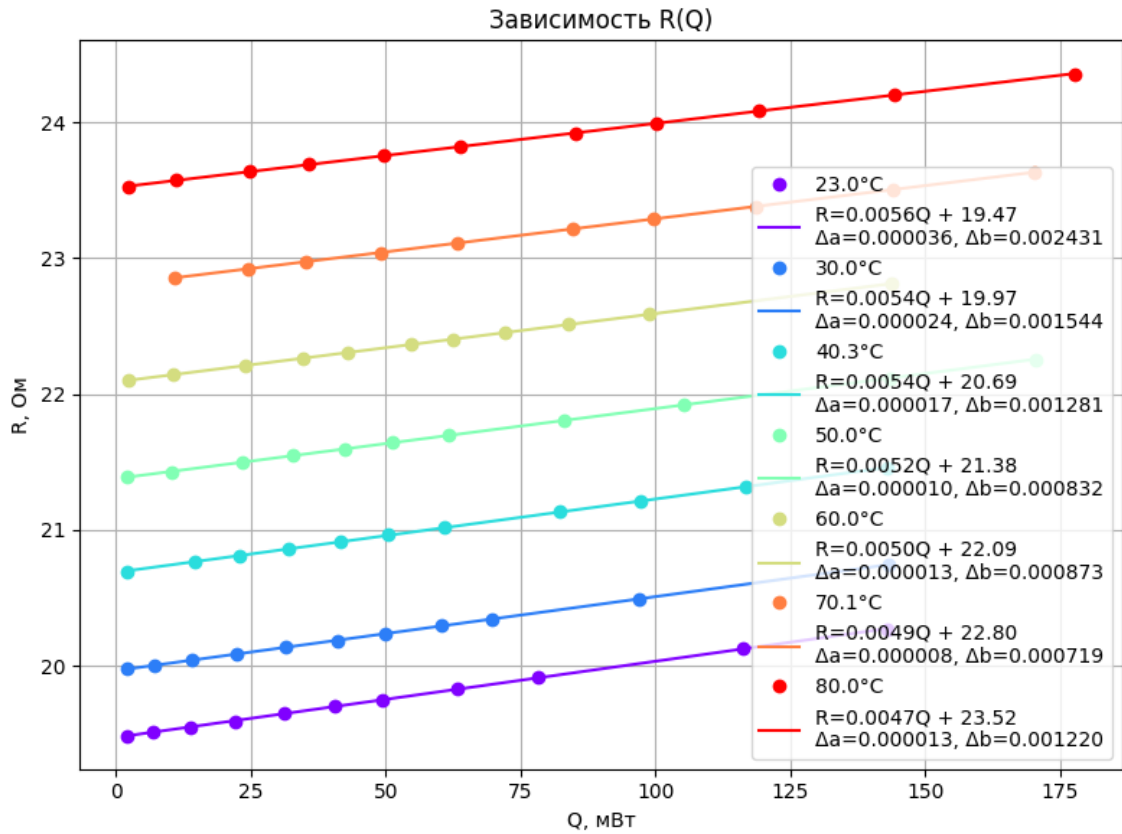


Рис. 3: Зависимость сопротивления нити от мощности

- Пользуясь значениями  $R_0$  из таблицы (2), построим график зависимости сопротивления нити от её температуры  $R(T)$  (см. рисунок (4)).

Полученная зависимость линейна. Построим наилучшую прямую и определим её наклон  $\frac{dR}{dT}$  с помощью метода наименьших квадратов.

$$k = \frac{\langle xy \rangle - \langle x \rangle \langle y \rangle}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = \frac{\langle TR \rangle - \langle T \rangle \langle R \rangle}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} = 0.07094 \frac{\Omega}{^\circ\text{C}}$$

$$b = \langle y \rangle - k \langle x \rangle = \langle R \rangle - k \langle T \rangle = 17.8307 \Omega$$



$t, ^\circ\text{C}$	$R_0, \Omega$	$\sigma_{R_0} \Omega$	$\frac{dR}{dQ}, 10^{-5} \frac{\Omega}{\text{Вт}}$	$\sigma_{\frac{dR}{dQ}}, 10^{-5} \frac{\Omega}{\text{Вт}}$	$\varepsilon_{R_n} = \varepsilon_Q$
23.0	19.4740	0.0024	560	3.6	0.008
30.0	19.9656	0.0015	545	2.4	0.008
40.3	20.6881	0.0013	539	1.7	0.008
50.0	21.3775	0.0008	515	1.0	0.008
60.0	22.0891	0.0009	503	1.3	0.008
70.1	22.8018	0.0007	487	0.8	0.008
80.0	23.5186	0.0012	472	1.3	0.008

Таблица 2: Значения сопротивлений и коэффициентов нагрузочных прямых

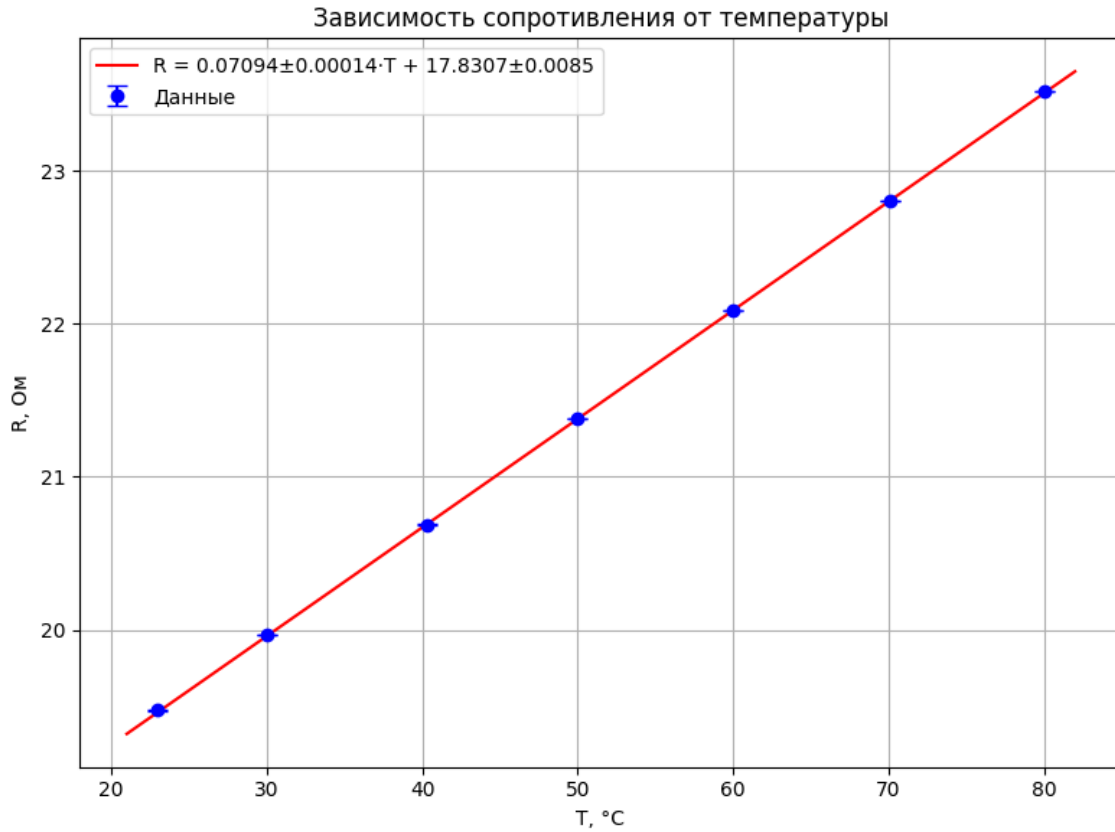


Рис. 4: Зависимость сопротивления от температуры

Оценим погрешности.

$$\sigma_k = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle y^2 \rangle - \langle y \rangle^2}{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} - k^2} \frac{\Omega}{^\circ\text{C}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle R^2 \rangle - \langle R \rangle^2}{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} - k^2} = 0.00014 \frac{\Omega}{^\circ\text{C}}$$

$$\sigma_b = \sigma_k \sqrt{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2} = \sigma_k \sqrt{\langle T^2 \rangle - \langle T \rangle^2} = 0.0085 \Omega$$

$$\frac{dR}{dT} = (0.07094 \pm 0.00014) \frac{\Omega}{^\circ\text{C}} = (7.094 \pm 0.014) \cdot 10^{-2} \frac{\Omega}{^\circ\text{C}}$$

Сравним температурный коэффициент сопротивления материала нити  $\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dT}$ , где  $R_{273}$  — сопротивление проволоки при  $T = 273 \text{ K}$ , с табличным.

$$\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dT} = \frac{(7.094 \pm 0.014) \cdot 10^{-2} \frac{\Omega}{^\circ\text{C}}}{(17.831 \pm 0.009) \Omega} = (3.978 \pm 0.008) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\alpha_{Pt} = (3.90 \pm 0.01) \cdot 10^{-3} \frac{1}{K}$$

Значения отличаются на 2%.

9. Используя угловой коэффициент температурной зависимости сопротивления п. 8 и угловые коэффициенты нагрузочных прямых из п. 7, вычислим наклон зависимости выделяющейся на нити мощности  $Q$  от её перегрева  $\Delta T$  относительно стенок для каждого из значений температур:

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

Рассчитанные значения приведены в таблице (3).

$t, ^\circ\text{C}$	$\frac{dR}{dQ}, \frac{\Omega}{\text{Вт}}$	$\frac{dQ}{d(\Delta T)}, \frac{\text{мВт}}{\text{К}}$	$\sigma \left( \frac{dQ}{d(\Delta T)} \right), \frac{\text{мВт}}{\text{К}}$	$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$\sigma_k, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$\ln T$	$\ln \frac{dQ}{d(\Delta T)}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
23,0	5,60	12,67	0,07	0,0249	0,0014	5,6904	-4,369	0,0003	0,006
30,0	5,438	13,04	0,06	0,0256	0,0014	5,7137	-4,340	0,0003	0,005
40,3	5,394	13,15	0,05	0,0258	0,0014	5,7472	-4,332	0,0003	0,004
50,0	5,153	13,76	0,04	0,0271	0,0015	5,7777	-4,2859	0,0003	0,0027
60,0	5,026	14,11	0,04	0,0277	0,0015	5,8081	-4,261	0,0003	0,003
70,1	4,874	14,55	0,04	0,0286	0,0016	5,8380	-4,2303	0,0003	0,0024
80,0	4,720	15,02	0,05	0,0295	0,0016	5,8665	-4,198	0,0003	0,003

Таблица 3: Расчет коэффициентов теплопроводности и  $dQ/d(\Delta T)$

Отсюда, с учётом формулы (5), найдём коэффициенты теплопроводности газа  $\kappa$  для каждой температуры термостата  $T_0$ .

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

Оценим погрешности полученных результатов.

$$\varepsilon \left( \frac{dQ}{d(\Delta T)} \right) = \sqrt{\varepsilon_Q^2 + \varepsilon_T^2 + 2\varepsilon_{R_0}^2 + \varepsilon_{dR/dT}^{\text{случ}} + \varepsilon_{dR/dQ}^{\text{случ}}}$$

$$\varepsilon_\kappa = \sqrt{\varepsilon_L^2 + \varepsilon_{dQ/dT}^{\text{случ}} + \frac{\varepsilon_{r_0}^2 + \varepsilon_{r_1}^2}{\ln^2(r_0/r_1)}}$$

Значения занесем в таблицу (3).

График зависимости  $\kappa(T)$  изображен на рисунке (5).

10. Построим график зависимости теплопроводности воздуха от температуры газа  $\kappa(T)$ . Сравним результаты с табличными данными.

Предполагая, что  $\kappa$  степенным образом зависит от абсолютной температуры  $T$ :

$$\kappa \propto T^\beta,$$

построим график в двойном логарифмическом масштабе (в координатах  $\ln \kappa$  против  $\ln T$ ) и определим из него показатель степени  $\beta$ .

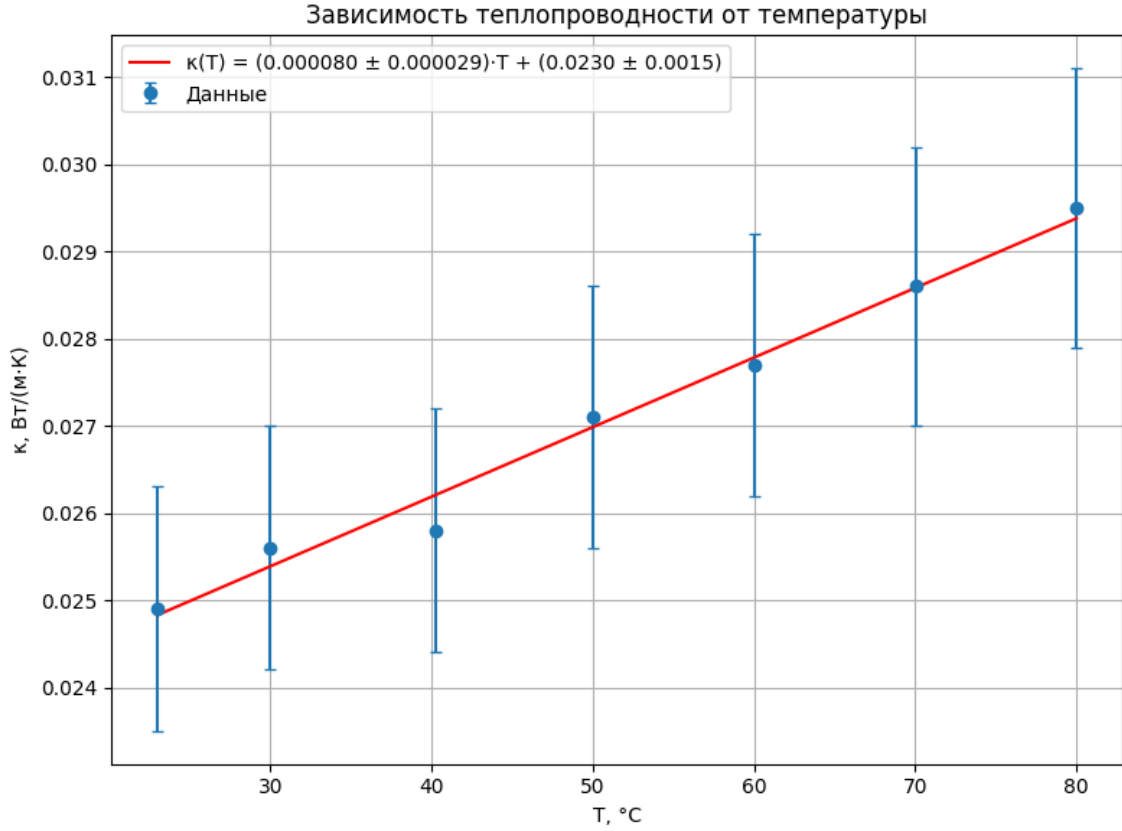


Рис. 5: Зависимость  $\kappa(T)$

В связи с тем, что значения  $\kappa$  и  $\frac{dQ}{d(\Delta T)}$  отличаются в  $\frac{2\pi L}{\ln(r_0/r_1)}$  раз, графики  $\ln \kappa$  от  $\ln T$  и  $\ln \frac{dQ}{d(\Delta T)}$  от  $\ln T$  будут отличаться только смещением вдоль оси — коэффициент наклона останется неизменным.

Рассчитаем погрешности.

$$\sigma_{\ln(dQ/d(\Delta T))} = \varepsilon_{dQ/d(\Delta T)}$$

$$\sigma_{\ln T} = \varepsilon_T$$

Значения занесем в таблицу (3). График представлен на рисунке (6), аппроксимирующая прямая проведена методом хи-квадрат.

Рассчитаем погрешности.

$$\sigma_{\beta}^{\text{случ}} = \sqrt{\frac{\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2}{\sum_{i=1}^7 \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}}} = 0.025$$

$$\varepsilon_{\beta}^{\text{приб}} = \sqrt{\varepsilon_{x_i}^2 + \varepsilon_{y_i}^2} \ll \varepsilon_{\beta}^{\text{случ}}$$

Запишем значение  $\beta$ .

$$\beta = (0.980 \pm 0.025) = (9.80 \pm 0.25) \cdot 10^{-1}$$

Проверим гипотезу о линейности. Больше 2/3 точек в пределах погрешности лежат на аппроксимирующей прямой (5 из 7).

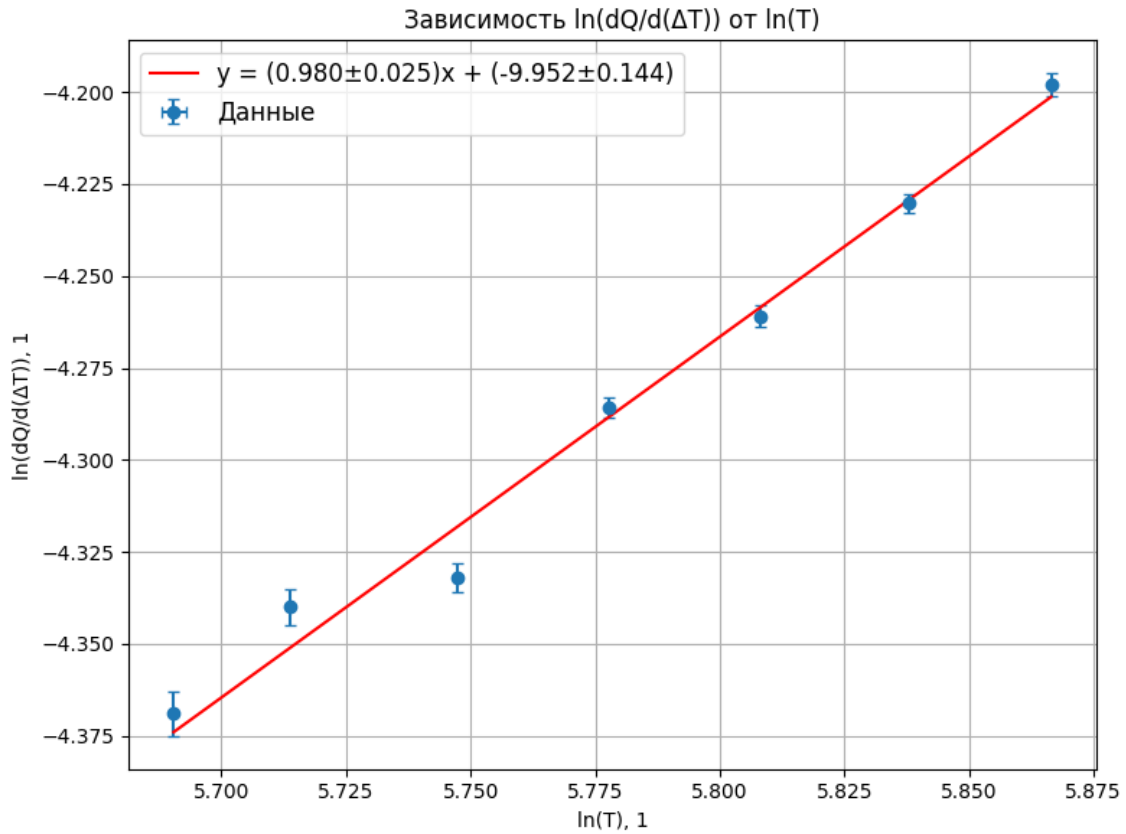


Рис. 6: Зависимость  $\ln(\frac{dQ}{d(\Delta T)})$  от  $\ln(T)$

Число степеней свободы:  $\text{dof} = 7 - 2 = 5$ .

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(y_i - a - bx_i)^2}{\sigma_{y_i}^2} = 23.5.$$

$$\chi^2/\text{dof} = 4.7$$

Чтобы проверить гипотезу о линейности, нужно сравнить значение  $\chi^2/\text{dof}$  с единицей. Значение  $\chi^2/\text{dof} = 4.7 \gg 1$  указывает на отклонение от линейности или занижение погрешностей.

Полученное значение показателя степени  $\beta$  вдвое превышает предсказанное упрощенной теорией ( $\approx 1/2$ ), что заставляет предположить существование температурной зависимости эффективного сечения столкновений молекул.

## Вывод

Все цели работы были достигнуты.

Зависимость коэффициента теплопроводности воздуха при атмосферном давлении от температуры измерена. Эта зависимость и промежуточные выводы указаны выше.