

Лабораторная работа №2.2.3
Измерение теплопроводности воздуха при атмосферном
давлении

Струков О. И.
Б04-404

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

Оборудование: цилиндрическая колба с натянутой по оси нитью; термостат; вольтметр и амперметр; источник постоянного напряжения; магазин сопротивлений.

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 $\bar{q} = -k\nabla T$, где $k \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$ — коэффициент теплопроводности.

Молекулярно-кинетическая теория дает следующую оценку для коэффициента теплопроводности газов:

$$k \sim \lambda \bar{\nu} \cdot n c_V \quad (1)$$

С помощью некоторых преобразований мы получаем, что

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

Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 1. На оси полой цилиндрической трубы с внутренним диаметром $2r_0 \sim 1$ см размещена металлическая нить диаметром $2r_1 \sim 0,05$ мм и длиной $L \sim 40$ см (материал нити и точные геометрические размеры указаны в техническом описании установки). Полость трубы заполнена воздухом (полость через небольшое отверстие сообщается с атмосферой). Стенки трубы помещены в кожух, через которых пропускается вода из термостата, так что их температура t_0 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 нити по закону Ома: $R = \frac{U}{I}$.

Сопротивление нити является однозначной функцией её температуры $R(t)$. Эта зависимость может быть измерена с помощью термостата по экстраполяции мощности нагрева к нулю $Q \rightarrow 0$, когда температура нити и стенок совпадают $t_1 \approx t_0$. Альтернативно, если материал нити известен, зависимость его удельного сопротивления от температуры может найдена по справочным данным.

На рис. 2 представлена схема электрической установки:

Схема рис. 2 предусматривает использование одного вольтметра и эталонного сопротивления $R_\vartheta \sim 10$ Ом (точное значение R_ϑ и его класс точности указаны в техническом описании установки),

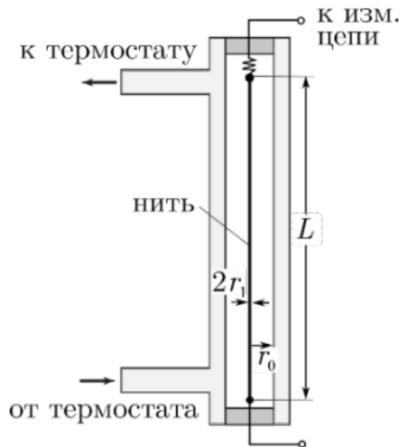


Рис. 1: Схема установки

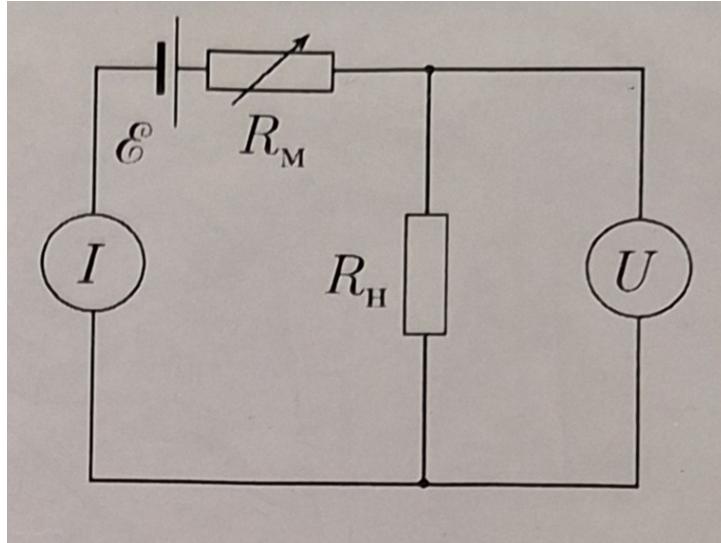


Рис. 2: Электрическая схема измерения сопротивления нити и мощности нагрева

включённого последовательно с нитью. В положении переключателя 2 вольтметр измеряет напряжение на нити, а в положении 1 — напряжение на R_9 , пропорциональное току через нить. Для исключения влияния контактов и подводящих проводов эталонное сопротивление R_9 также необходимо подключать в цепь по четырёхпроводной схеме. Ток в цепи в обеих схемах регулируется с помощью реостата или магазина сопротивлений R_m , включённого последовательно с источником напряжения.

Методика измерений

Принципиально неустранимая систематическая ошибка измерения температуры с помощью термометра сопротивления возникает из-за необходимости пропускать через резистор (нить) измерительный ток. Чем этот ток выше, тем с большей точностью будет измерен как он сам, так и напряжение. Однако при этом квадратично возрастает выделяющаяся на резисторе мощность $Q = UI = I^2R$. Следовательно, температура резистора становится выше, чем у объекта, температуру которого надо измерить. Измерения же при малых токах не дают достаточной точности (в частности, из-за существенного вклада термоэлектрических явлений в проводниках и контактах). Эта проблема решается построением нагрузочной кривой - зависимости измеряемого сопротивления R от выделяющейся в нём мощности $R(Q)$, с последующей экстраполяцией к нулевой мощности $Q \rightarrow 0$ для определения сопротивления $R_0 = R(0)$, при котором его температура равна температуре измеряемого объекта. Кроме того, в данной работе измерение нагрузочных кривых позволяет в ходе эксперимента получить температурную зависимость сопротивления нити, так как при $Q \rightarrow 0$ температура нити равна температуре термостата ($T \approx T_0$). В исследуемом интервале температур ($20\text{-}80\ ^\circ\text{C}$) зависимость сопротивления от температуры можно с хорошей точностью аппроксимировать линейной функцией:

$$R(t) = R_{273} \cdot (1 + \alpha t) \quad (3)$$

где $\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dT}$ - температурный коэффициент сопротивления материала.

Ход работы

- В первую очередь были проведены предварительные расчёты параметров опыта: максимально допустимый перегрев нити относительно термостата был принят равным $\Delta t_{max} = 30 ^\circ C$. По формуле (2) оценена максимальная мощность нагрева $Q_{max} = 0,377$ Вт. Отсюда найдена максимальная сила тока $I_{max} = 0,137$ А, которая не должна быть превышена в ходе эксперимента.
- Экспериментальная установка была подготовлена к работе: на магазине было выставлено максимальное сопротивление (99 кОм), чтобы ток в цепи при её замыкании был минимален. Были включены и настроены вольтметр и амперметр, включены источник питания и термостат.
- Далее были проведены измерения силы тока и напряжения в зависимости от выставленного сопротивления при пяти различных температурах. В таблице приведены значения сопротивления нити R в зависимости от мощности нагрева Q.

23 °C		38 °C		51 °C		64 °C		78 °C	
R, Ом	Q, мВт								
19,7	0,661	20,8	3,74	21,8	3,86	22,6	0,75	23,6	0,3
19,9	32,16	20,9	32,99	21,9	33,6	22,8	34,2	23,8	34,8
20,2	89,04	21,2	89,5	22,1	89,8	23,1	89,9	24,1	90,1
20,8	195,6	21,5	147,8	22,4	146,3	23,3	145,4	24,3	152,3
21,03	238,3	21,8	192,4	22,7	189,8	23,5	187,2	24,5	184,1
21,12	258,8	21,99	232,9	22,9	228,6	23,7	224,4	24,7	219,8
21,16	268,3	22,1	257,6	22,97	252,3	23,8	246,9	24,8	241,1

- По результатам измерений был построен график зависимости R(Q) для пяти различных температур:

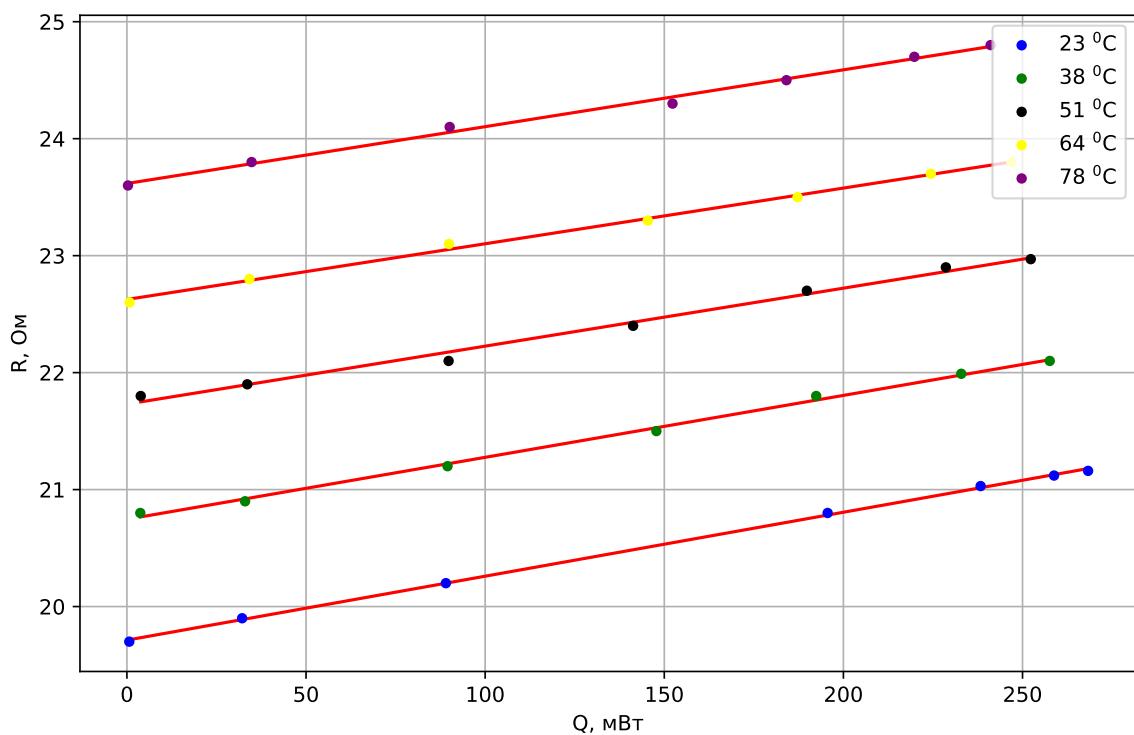


Рис. 3: График зависимости R(Q)

5. Для каждой прямой был найден угловой коэффициент наклона $\frac{dR}{dQ}$ и точка пересечения с осью ординат R_0 , в которой температура нити соответствовала бы температуре термостата. Погрешности оценены с помощью МНК. Результаты внесены в таблицу:

$t, {}^\circ C$	$dR/dQ, \text{Ом/Вт}$	$R_0, \text{Ом}$
23	$0,603 \pm 0,02$	$19,58 \pm 0,03$
38	$0,516 \pm 0,04$	$20,78 \pm 0,03$
51	$0,507 \pm 0,05$	$21,71 \pm 0,04$
64	$0,486 \pm 0,05$	$22,60 \pm 0,04$
78	$0,467 \pm 0,05$	$23,65 \pm 0,04$

6. По полученным данным был построен график зависимости сопротивления проволоки при отсутствии нагрева от температуры. Видно, что все точки примерно ложатся на одну прямую.

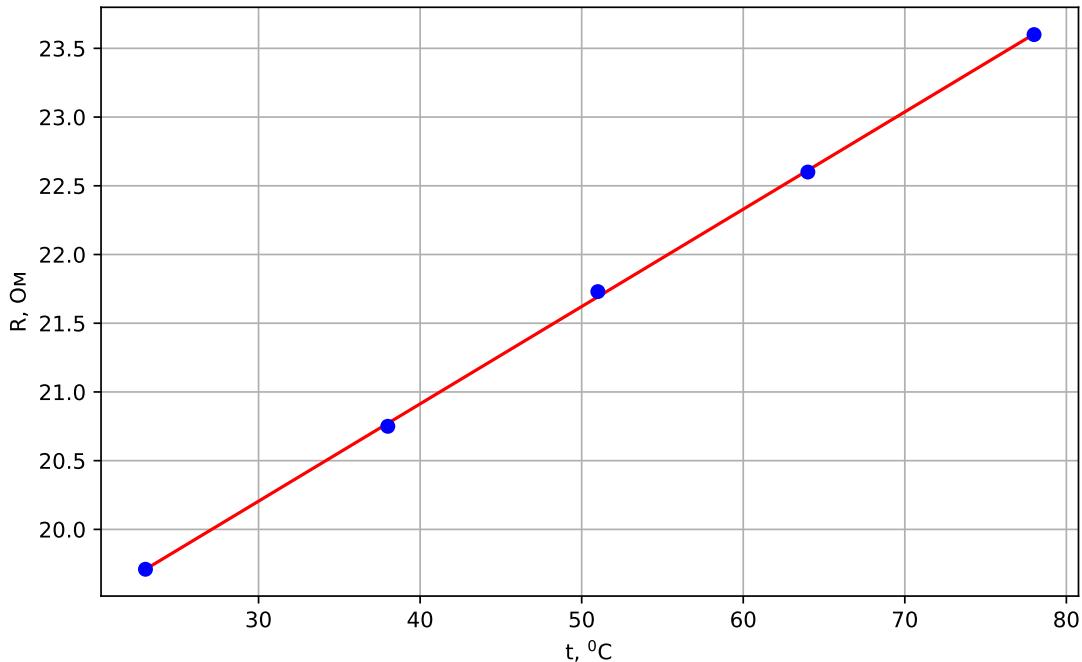


Рис. 4: График зависимости $R(t)$

7. С помощью МНК был определён наклон полученной прямой: $\frac{dR}{dT} = 0,51 \pm 0,04 \text{ Ом/К}$.
8. С использованием полученных данных была найдена зависимость выделяющейся на нити мощности Q от её перегрева ΔT относительно стенок. Затем с помощью формулы (2) были определены коэффициенты теплопроводности воздуха k при каждой из исследуемых температур:

$$\frac{dQ}{d(\Delta T)} = \frac{dR_0}{dT} / \frac{dR}{dQ}, \quad k = \frac{dQ}{d(\Delta T)} / \frac{2\pi L}{\ln \frac{r_0}{r_1}} = \frac{dR_0}{dT} \frac{\ln \frac{r_0}{r_1}}{2\pi L} / \frac{dR}{dQ}$$

9. Построен график зависимости теплопроводности воздуха от его температуры $k(t)$

$t, {}^{\circ}\text{C}$	$k, 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{с}}$
23	23, 8
38	27, 9
51	28, 4
64	29, 6
78	30, 9

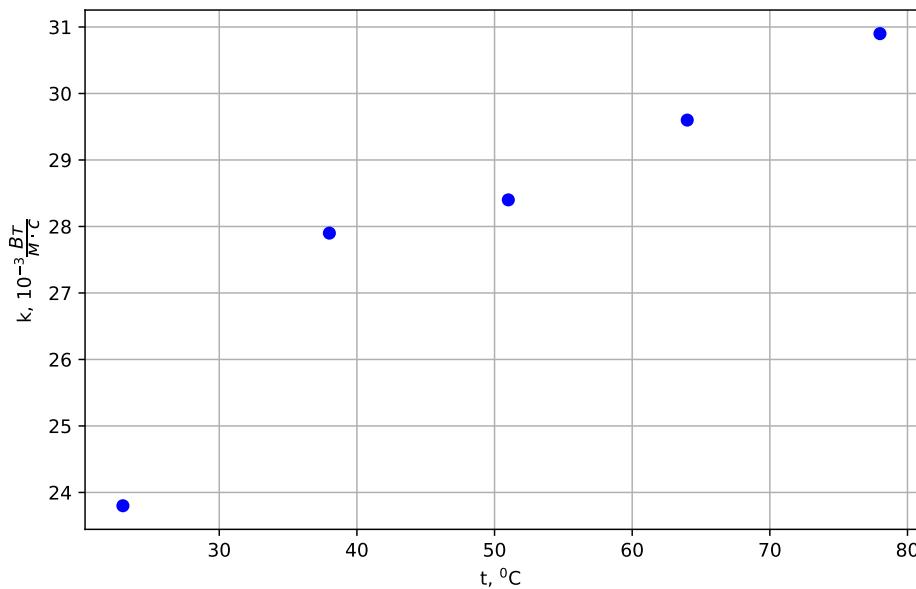


Рис. 5: График зависимости $k(t)$

10. Исходя из предположения, что коэффициент теплопроводности газа степенным образом зависит от абсолютной температуры, был построен график $\ln k(\ln T)$ и из него определён показатель степени β для зависимости $k \sim T^\beta$.

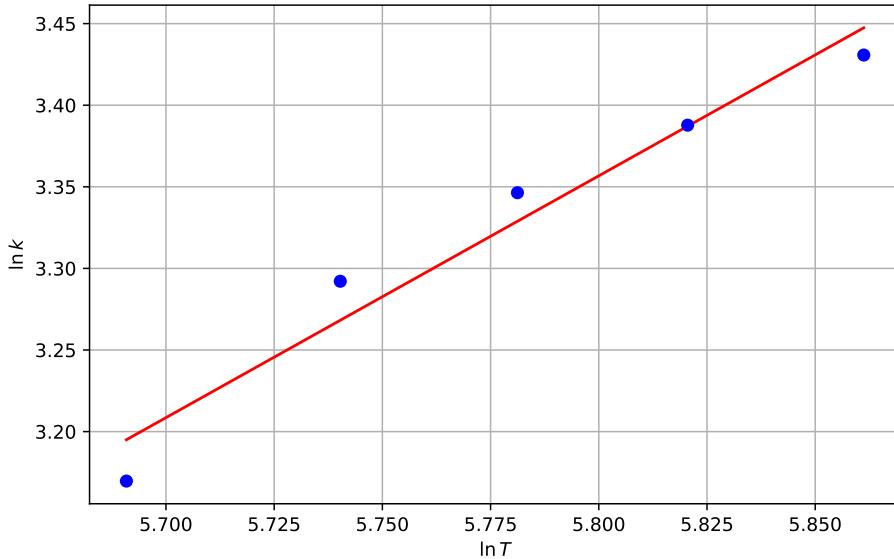


Рис. 6: График зависимости $\ln k(\ln T)$

Таким образом, $\beta \approx 0,58$

Поскольку коэффициент теплопроводности газа пропорционален \sqrt{T} , искомый показатель степени должен быть $\beta = 0,5$.

Вывод

В результате выполнения работы была исследована зависимость сопротивления платиновой проволоки от температуры и мощности проходящего через неё тока, после чего был определён коэффициент теплопроводности воздуха при пяти различных температурах, а также найден показатель степени β зависимости $k \sim T^\beta$. Полученные значения близки к теоретическим предположениям.