Московский физико-технический институт
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Отчет о выполнении лабораторной работы №2.2.3

Измерение теплопроводности воздуха при атмосферном давлении

Выполнил студент группы Б03-405
Тимохин Даниил

18 февраля 2025 г.

1. Аннотация

В данной работе исследуется явление теплопроводности в газах. Вычисляется коэффициент теплопроводности воздуха и исследуется его зависимость от температуры.

2. Теоретическая справка

Теплопроводность - это процесс передачи тепловой энергии от нагретых частей системы к холодным за счёт хаотического движения частиц среды. В газах это происходит за счет непосредственной передачи кинетической энергии от быстрых молекул к медленным при их столкновении. Этот процесс описывается законом Фурье:

$$\vec{q} = -\kappa \cdot \nabla T, \tag{1}$$

где κ - коэффициент теплопроводности.

Согласно МКТ мы имеем оценку коэффициента теплопроводности:

$$\kappa \sim \lambda \bar{v} \cdot n c_V, \tag{2}$$

где λ - длина свободного пробега молекул газа, $\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$ - средняя скорость их теплового движения, n - концентрация газа, c_V - теплоёмкость при постоянном объёме.

Длина свободного пробега может быть оценена, как

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma}, \tag{3}$$

где σ - эффективное сечение столкновений молекул друг с другом. Это значит, что теплопроводность зависит только от температуры. Если предположить, что $\sigma = const$, то $\kappa \propto \frac{\bar{v}}{\sigma} \propto \sqrt{T}$. Однако это не совсем так. σ является убывающей Функцией от температуры, так как чем выше температура, тем более узконаправленным будет удар о группу молекул

Посмотрим на экспериментальную установку. Здесь тепло передаётся по радиусу. В других же направлениях температура постоянна. Тогда градиент линейный и тогда получим простое дифференциальное уравнение

$$q = -\kappa \frac{dT}{dr} \tag{4}$$

Предположим, что ΔT мало на этом промежутке. Тогда можно пренебречь зависимостью κ от T. Тогда разделив дифференциал и интегрируя переменные, получим

$$Q = -2\pi r L \cdot \kappa \frac{dT}{dr} = const \tag{5}$$

$$Q = \frac{2\pi L}{\ln r_0/r_1} \kappa \Delta T \tag{6}$$

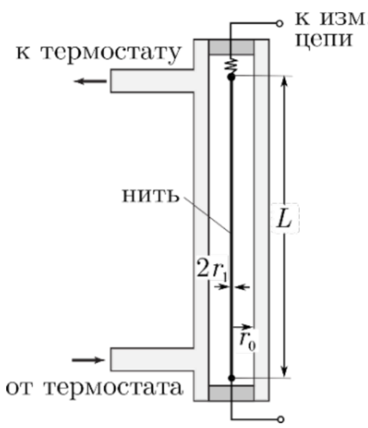

Рис. 1. Установка

Оценим время установления равновесия. Чтобы прогреть весь слой газа на ΔT потребуется $Q = nSa \cdot c_p \Delta T$. С другой стороны из предыдущих уравнений $Q = \kappa \frac{\Delta T}{a} S\tau$. В итоге получим, что:

$$\tau \sim \frac{a^2}{\chi} \tag{7}$$

Для данной задачи можно взять $a \approx 1$ *см*, а для воздуха при нормальных условиях $\chi \approx 0.2$ *см*^{2}/*с*. Это значит, что $\tau \approx 5$ *с*. Это значит, что равновесие будет устанавливаться за десятки секунд. Этой оценки достаточно для нашей задачи.

В данном опыте нагрев происходит за счёт нити, по которой течёт ток. Она подключена к двум мультиметрам для измерения напряжения на ней и силы тока, проходящей через неё. Из них мы можем получить выделяемую мощность, а учитывая то, что сопротивление линейно зависит от температуры, то мы получаем все нужные данные.

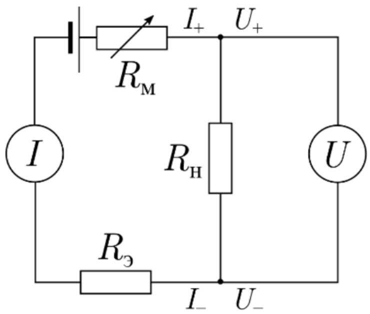

Рис. 2. Схема подключения

3. Оборудование

2 мультиметра
установка
таблица эксель

4. Результаты измерений и обработка данных

Не будем расшаркиваться по поводу данных, потому сразу вставим графики для каждой температуры. Погрешности измерений очень малы, поэтому не будут видны на графике.

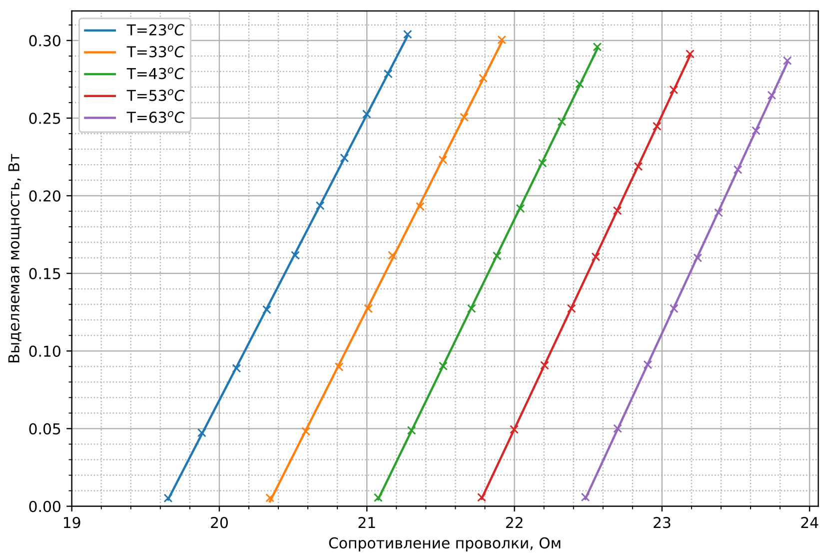

Рис. 3. Зависимость мощности от сопротивления для температуры внешнего контура.

Таблица 1. Результаты нахождения линейной зависимости

Температура, ^oC	k, Вт/Ом	ε_k	b, Вт	ε_b
23	0.1840	$3\cdot10^{-3}$	-3.6122	$7\cdot10^{-5}$
33	0.1883	$5\cdot10^{-3}$	-3.8280	$1\cdot10^{-4}$
43	0.1954	$3\cdot10^{-3}$	-4.1139	$6\cdot10^{-5}$
53	0.2021	$2\cdot10^{-3}$	-4.3961	$4\cdot10^{-5}$
63	0.2053	$3\cdot10^{-3}$	-4.6103	$5\cdot10^{-5}$

Из нашей линейной зависимости при представлении в виде $Q = k_{Q(R)}R + b_{Q(R)}$ получим, что для Q=0 Дж, то $R_0 = \frac{-b_{Q(R)}}{k_{Q(R)}}$ - сопротивление при температуре термостата.

получим таблицу

Таблица 2. Сопротивление проволоки в зависимости от температуры

Температура, ^oC	R, Ом	ε_R
23	19.629	$2 \cdot 10^{-3}$
33	20.327	$5 \cdot 10^{-3}$
43	21.054	$3 \cdot 10^{-3}$
53	21.754	$2 \cdot 10^{-3}$
63	22.457	$3 \cdot 10^{-3}$

Делаем аппроксимацию и получаем

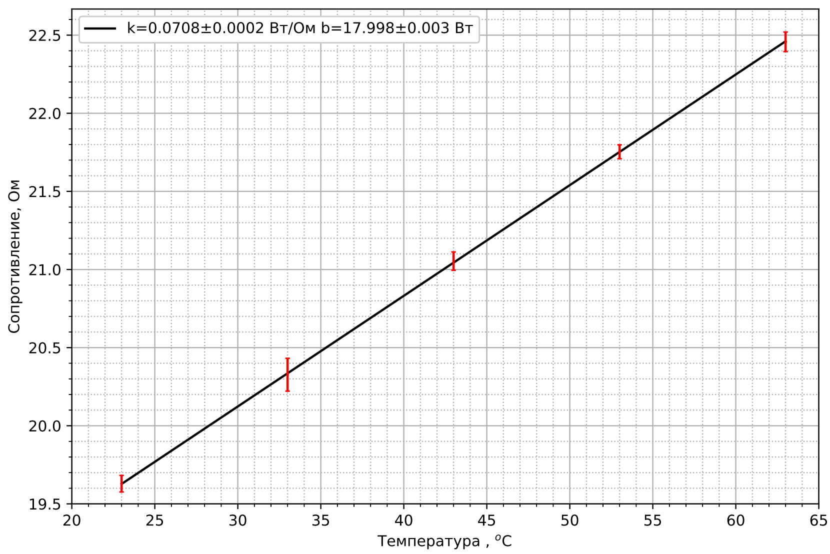

Рис. 4. Аппроксимация зависимости сопротивления от температуры

Из формулы $R = R_{273}(1 + \alpha T)$, получаем, что $\alpha = \frac{k_{R(T)}}{b_{R(T)}}$.
Тогда $\alpha = 3.93 \cdot 10^{-3}\ \ ^oC^{-1}$ $\varepsilon_\alpha = 0.003$
Теперь используя формулу 6 и линейную зависимость сопротивления от температуры, получим формулу:

$$\kappa = \frac{k_{Q(R)} R_{273} \alpha \ln r_0/r_1}{2\pi L} \tag{8}$$

Возьмём предположение, что $\kappa = A\kappa_0^\beta$. Тогда прологарифмируем и построим линейную зависимость из которой найдём β

Таблица 3. Теплопроводность от температуры

Температура, K	Теплопроводность, $10^{-2} \frac{Вт}{мK}$	ε_κ
296	2.56	$4 \cdot 10^{-3}$
306	2.62	$6 \cdot 10^{-3}$
316	2.72	$4 \cdot 10^{-3}$
326	2.81	$3 \cdot 10^{-3}$
336	2.86	$3 \cdot 10^{-3}$

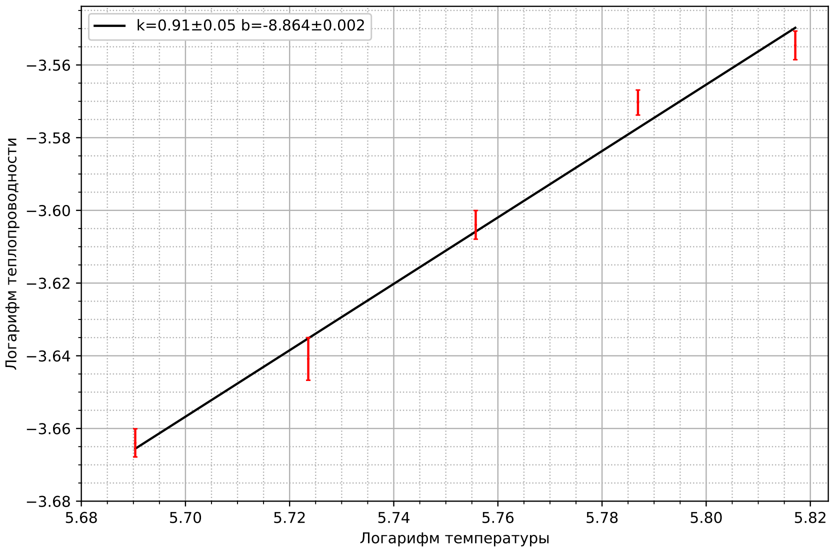

Рис. 5. Аппроксимация зависимости логарифма теплопроводности от логарифма температуры(в кельвинах)

Как видим наша зависимость линейная, так как $k \approx 0.9$, а значит $\sigma \sim \sqrt{T}^{-1}$ то есть монотонно убывает с температурой. Что возможно является правдой, так как значения κ находятся близко к справочным.

5. Обсуждение результатов и выводы

В данном работе был определен коэффициент зависимости сопротивления проволоки от температуры. Согласно справочным данным он соответствует платине.

Было проверено, что тепло распространяется в газах согласно закону Фурье. Вычислен коэффициент κ для различных температур. Выяснилось, что он зависит линейно от температуры в исследуемом диапазоне. На основе этого было выдвинуто предположение о зависимости эффективного сечения столкновений от температуры.