

Лабораторная работа 2.2.3
Определение теплопроводности газов при
атмосферном давлении

Дульмиев Муса, Б01-507

Московский физико-технический институт
Февраль 2026

1 Цель работы

Измерить коэффициент теплопроводности воздуха при атмосферном давлении в зависимости от температуры.

2 В работе используются

Цилиндрическая колба с натянутой по оси нитью; термостат; вольтметр и амперметр (цифровые мультиметры); эталонное сопротивление; источник постоянного напряжения; реостат (или магазин сопротивлений).

3 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

$$\vec{q} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right], \quad (1)$$

(количество теплоты, переносимое через единичную площадку в единицу времени) пропорциональна градиенту температуры ∇T :

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T, \quad (2)$$

где $k \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$ - коэффициент теплопроводности

$$k \sim \lambda \bar{v} \cdot n c_v$$

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

где λ - длина свободного пробега молекул газа, $\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$ — средняя скорость их теплового движения, n — концентрация (объёмная плотность) газа, $c_v = \frac{i}{2} k_B$ - его теплоёмкость при постоянном объёме в рас-

чёте на одну молекулу (i — эффективное число степеней свободы молекулы). Длина свободного пробега может быть оценена как $\lambda = \frac{1}{\sigma n}$, где σ — эффективное сечение столкновений молекул друг с другом. В модели частиц, как одинаковых твердых шариков $\sigma = \pi d^2$, где d - диаметр шарика. Тогда из (2) видно, что k не зависит от плотности и определяется только температурой. Рассматривая стационарную теплопроводность в цилиндрической геометрии, где пренебрегаются теплоотвод через торцы и перепад температур между нитью и стенками, а параметры газа считаются зависящими только от расстояния до оси системы, справедлива следующая формула

$$Q = \frac{2\pi L}{\ln \frac{r_0}{r_1}} k \cdot \Delta T \quad (3)$$

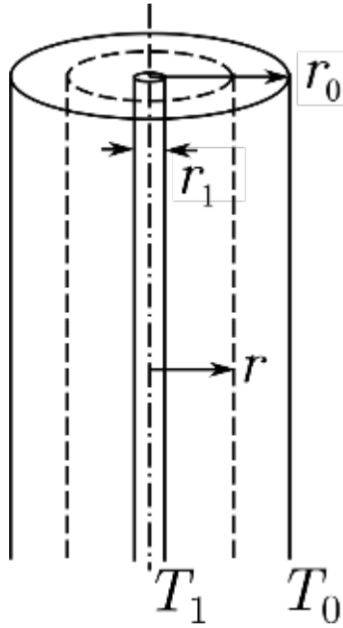


Рис. 1: Цилиндрическая установка

4 Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 2.

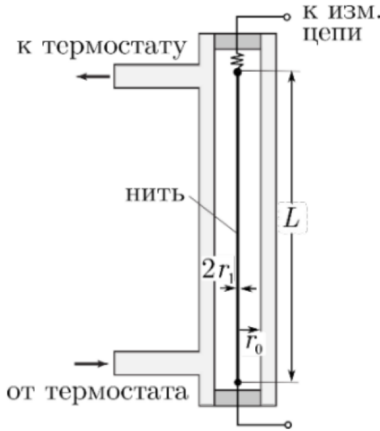


Рис. 2: Схема установки

На оси полой цилиндрической трубки с внутренним диаметром $2r_0 \approx 0,7 \pm 0,01$ см размещена металлическая нить диаметром $2r_1 \approx 0,05 \pm 0,003$ мм и длиной $L \approx 40 \pm 0,2$ см (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 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 $R(t)$. В исследуемом интервале температур ($20^\circ\text{--}80^\circ\text{C}$) зависимость сопротивления от температуры можно с хорошей точностью аппроксими-

мировать линейной функцией:

$$R(t) = R_{273}(1 + \alpha t), \quad (4)$$

где t - температура в $^{\circ}\text{C}$, R_{273} - сопротивление нити при температуре 0°C и $\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dT}$ - температурный коэффициент сопротивления материала.

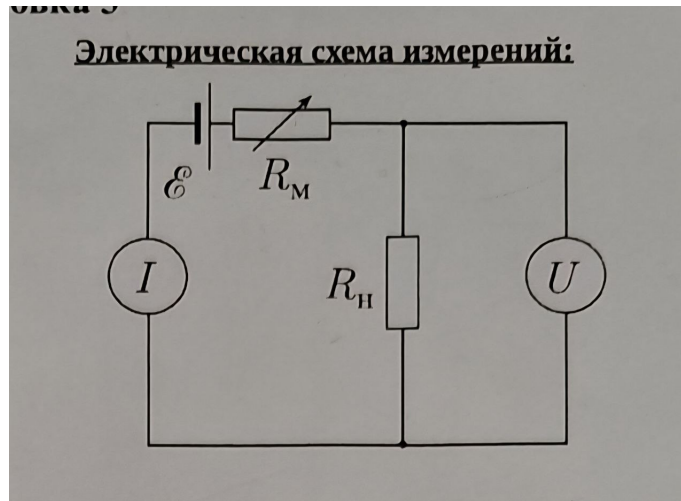


Рис. 3: Электрическая схема установки

В схеме рис. 3 для измерения напряжения и тока используется два мультиметра, работающие в режимах вольтметра и амперметра соответственно. Подключение к нити R_h осуществляется по четырёхпроводной схеме. По двум проводам (токовая пара I_+ и I_-) через сопротивление пропускается измерительный ток, а два других (потенциальная пара U_+ и U_-) используются для параллельного подключения вольтметра. Заметим, что при такой схеме внутреннее сопротивление приборов и сопротивление подводящих проводов практически не влияет на измерения: сопротивление амперметра не влияет на результат вовсе, а сопротивление вольтметра составляет обычно 1–100 МОм, что при $R_h \sim 10$ Ом вносит относительную ошибку не более 10^{-5} .

Ток в цепи в обеих схемах регулируется с помощью реостата или магазина сопротивлений R_M , включённого последовательно с источником напряжения.

5 Приборы и данные

- Цифровые мультиметры "Универсальный вольтметр В7-78/1 погрешность измерения постоянного тока $0,05\% + 0,1 \text{ мкА}$, погрешность измерения постоянного напряжения:
Если напряжение меньше 1 В, тогда $0,009\% \cdot U + 1 \text{ мкВ}$.
Если напряжение больше 1 В, то $0,012\% \cdot U + 10 \text{ мкВ}$
- Термостат Witeg

6 Методика измерений

Принципиально неустраняемая 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 $Q = UI = I^2 R$. 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 ($20-70^\circ\text{C}$) зависимость сопротивления от температуры можно с хорошей точностью аппроксимировать линейной функцией:

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

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

7 Выполнение

1. Проведем предварительные расчеты параметров опыта. Приняв максимально допустимый перегрев нити относительно термостата, а равным $\Delta t_{max} = 30^\circ C$, а коэффициент теплопроводности воздуха $k \approx 25 \frac{\text{мВт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, оценим максимальную мощность нагрева. $Q_{max} = \frac{2\pi L}{\ln \frac{r_0}{r_1}} k \cdot \Delta t_{max} = 381,4 \text{ мВт}$. Сопротивление платиновой нити при комнатной температуре $R_n \approx 20 \text{ Ом}$. Определим с помощью данных значений значения максимального тока в нити I_{max} и максимального напряжения на ней U_{max} .

$$U_{max} = \sqrt{Q_{max} R_n} = 2,76 \text{ В},$$

$$I_{max} = \sqrt{\frac{Q_{max}}{R_n}} = 138,1 \text{ мА}.$$

sectionОбработка результатов

1. Проведя 6 серий мы получили следующие результаты.

I, мА	U, мВ	R, Ом	σ_R , Ом	ε_R , %	Q, мВт	σ_Q , мВт	ε_Q , %
10.0	200	20.0	0.112	0.562	2.0	0.011	0.562
20.0	403	20.15	0.057	0.285	8.06	0.023	0.285
30.0	604	20.133	0.039	0.194	18.12	0.035	0.194
40.0	810	20.25	0.03	0.149	32.4	0.048	0.149
50.0	1018	20.36	0.025	0.124	50.9	0.063	0.124
60.0	1229	20.483	0.022	0.107	73.74	0.079	0.107
70.4	1452	20.625	0.02	0.095	102.221	0.097	0.095
80.0	1664	20.8	0.018	0.087	133.12	0.116	0.087
90.1	1892	20.999	0.017	0.081	170.469	0.138	0.081
100.0	2122	21.22	0.016	0.076	212.2	0.162	0.076

Таблица 1: T = 20°C

I, мА	U, мВ	R, Ом	σ_R , Ом	ε_R , %	Q, мВт	σ_Q , мВт	ε_Q , %
10.0	206	20.6	0.115	0.559	2.06	0.012	0.559
20.0	413	20.65	0.059	0.283	8.26	0.023	0.283
30.0	622	20.733	0.04	0.193	18.66	0.036	0.193
40.0	833	20.825	0.031	0.149	33.32	0.05	0.149
50.1	1047	20.898	0.026	0.123	52.455	0.065	0.123
60.1	1263	21.015	0.022	0.107	75.906	0.081	0.107
70.0	1484	21.2	0.02	0.095	103.88	0.099	0.095
80.1	1710	21.348	0.019	0.087	136.971	0.119	0.087
90.1	1944	21.576	0.017	0.081	175.154	0.141	0.081
100.1	2181	21.788	0.017	0.076	218.318	0.166	0.076

Таблица 2: $T = 30^\circ\text{C}$

I, мА	U, мВ	R, Ом	σ_R , Ом	ε_R , %	Q, мВт	σ_Q , мВт	ε_Q , %
10.0	213.6	21.36	0.119	0.556	2.136	0.012	0.556
20.0	427.8	21.39	0.06	0.282	8.556	0.024	0.282
30.0	643.5	21.45	0.041	0.192	19.305	0.037	0.192
40.0	861.3	21.532	0.032	0.148	34.452	0.051	0.148
50.0	1081.6	21.632	0.027	0.123	54.08	0.066	0.123
60.0	1306.7	21.778	0.023	0.106	78.402	0.083	0.106
70.0	1533.2	21.903	0.021	0.095	107.324	0.102	0.095
80.0	1767.9	22.099	0.019	0.087	141.432	0.123	0.087
90.0	2003.9	22.266	0.018	0.081	180.351	0.145	0.081
99.8	2247.3	22.518	0.017	0.076	224.281	0.17	0.076

Таблица 3: $T = 40^\circ\text{C}$

I, мА	U, мВ	R, Ом	σ_R , Ом	ε_R , %	Q, мВт	σ_Q , мВт	ε_Q , %
10.0	221.0	22.1	0.122	0.552	2.21	0.012	0.552
20.0	443.0	22.15	0.062	0.28	8.86	0.025	0.28
29.9	662.5	22.157	0.042	0.191	19.809	0.038	0.191
40.2	892.9	22.211	0.033	0.147	35.895	0.053	0.147
50.0	1117.9	22.358	0.027	0.122	55.895	0.068	0.122
60.0	1348.0	22.467	0.024	0.106	80.88	0.085	0.106
70.0	1583.0	22.614	0.021	0.094	110.81	0.105	0.094
80.0	1823.8	22.797	0.02	0.086	145.904	0.126	0.086
90.1	2071.0	22.986	0.018	0.08	186.597	0.15	0.08
100.1	2322.2	23.199	0.018	0.076	232.452	0.176	0.076

Таблица 4: $T = 50^\circ\text{C}$

I, мА	U, мВ	R, Ом	σ_R , Ом	ε_R , %	Q, мВт	σ_Q , мВт	ε_Q , %
10.0	227.8	22.78	0.125	0.55	2.278	0.013	0.55
20.1	457.9	22.781	0.063	0.277	9.204	0.026	0.277
30.0	686.1	22.87	0.043	0.19	20.583	0.039	0.19
40.1	919.0	22.918	0.033	0.146	36.852	0.054	0.146
50.0	1153.4	23.068	0.028	0.122	57.67	0.07	0.122
60.0	1390.0	23.167	0.024	0.105	83.4	0.088	0.105
70.1	1634.8	23.321	0.022	0.094	114.599	0.108	0.094
80. $T = 0$	1880.3	23.504	0.02	0.086	150.424	0.129	0.086
90.1	2135.0	23.696	0.019	0.08	192.363	0.154	0.08
100.0	2392.7	23.927	0.018	0.076	239.27	0.181	0.076

Таблица 5: $T = 60^\circ\text{C}$

I, мА	U, мВ	R, Ом	σ_R , Ом	ε_R , %	Q, мВт	σ_Q , мВт	ε_Q , %
10.0	234.9	23.49	0.128	0.547	2.349	0.013	0.547
20.0	470.3	23.515	0.065	0.277	9.406	0.026	0.277
30.1	709.3	23.565	0.044	0.188	21.35	0.04	0.188
40.0	946.4	23.66	0.035	0.146	37.856	0.055	0.146
50.0	1190.7	23.814	0.029	0.121	59.535	0.072	0.121
60.0	1434.2	23.903	0.025	0.105	86.052	0.09	0.105
70.0	1683.8	24.054	0.023	0.094	117.866	0.111	0.094
80.1	1940.1	24.221	0.021	0.086	155.402	0.133	0.086
90.2	2203.0	24.424	0.019	0.08	198.711	0.159	0.08
100.2	2468.3	24.634	0.019	0.075	247.324	0.186	0.075

Таблица 6: $T = 70^\circ\text{C}$

2. Построим по методу наименьших квадратов график зависимости сопротивления нити от мощности $R(Q)$.

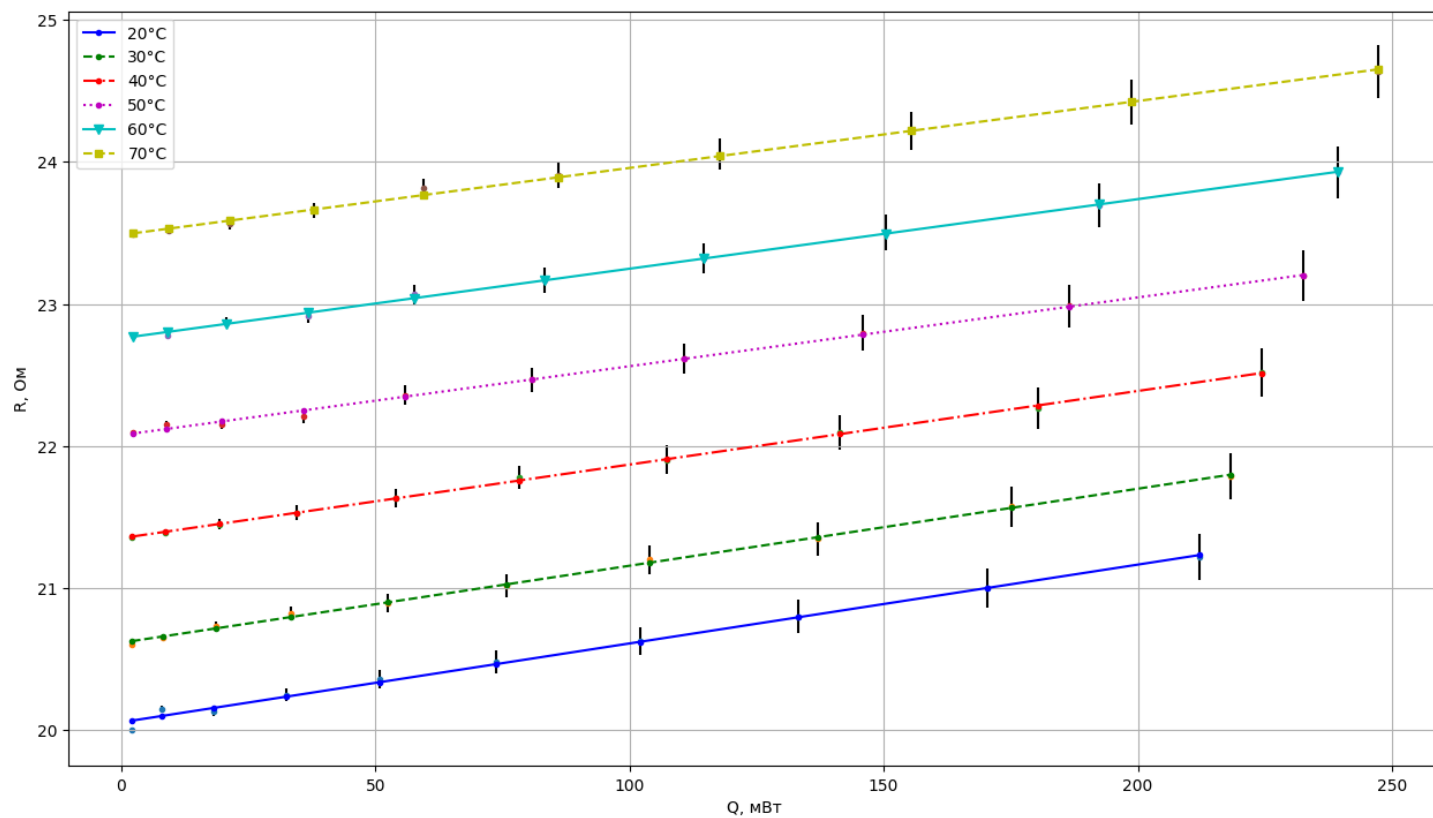


Рис. 4: График №1 Зависимость $R(Q)$

Из графика видно, что зависимость линейная. Определим сопротивление нити при $Q \rightarrow 0$ R_0 и угловые коэффициенты $\frac{dR}{dQ}$ для исследуемых температур

T, °C	$\frac{dR}{dQ}, \frac{\text{ОМ}}{\text{Вт}}$	$\sigma_{\frac{dR}{dQ}}, \frac{\text{ОМ}}{\text{Вт}}$	$\varepsilon_{\frac{dR}{dQ}}, \%$	$R_0, \text{ОМ}$	$\sigma_{R_0}, \text{ОМ}$	$\varepsilon_{R_0}, \%$
20	0.0055	0.00015	2.733	20.056	0.016	0.08
30	0.0054	8e-05	1.562	20.616	0.009	0.045
40	0.0052	5e-05	0.989	21.352	0.006	0.027
50	0.0048	8e-05	1.74	22.078	0.01	0.044
60	0.0049	6e-05	1.322	22.759	0.008	0.034
70	0.0047	8e-05	1.783	23.487	0.01	0.044

Таблица 7: Сопротивления R_0 и коэффициенты $\frac{dR}{dQ}$ для исследуемых температур

3. Пользуясь полученными значениями R_0 построим по МНК график зависимости сопротивления нити от температуры $R(T)$.

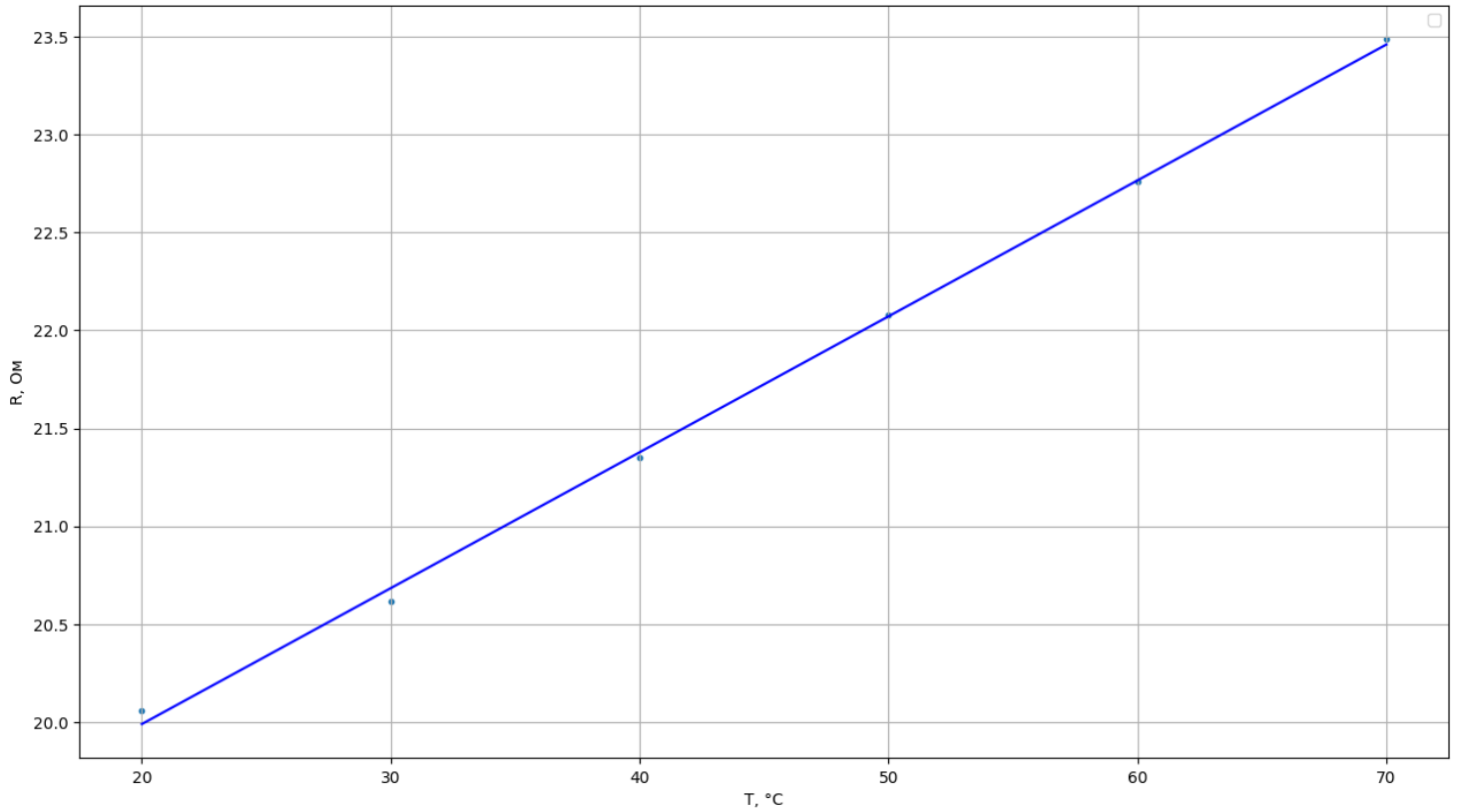


Рис. 5: График №2 Зависимость $R(T)$

Из графика видно, что зависимость линейная. Определим наклон прямой $\frac{dR}{dT}$, сопротивление при 0°C R_{273} и температурный коэффициент сопротивления материала нити α .

$$\frac{dR}{dT} = (6,95 \pm 0,12) \cdot 10^{-2} \frac{\text{Ом}}{\text{К}} (\varepsilon_{\frac{dR}{dT}} = 1,73\%),$$

$$R_{273} = 18,599 \pm 0,059 \text{ Ом} (\varepsilon_{R_{273}} = 0,32\%),$$

$$\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dT} = 3,734 \pm 0,067, 10^{-3} \text{ К}^{-1} (\varepsilon_{\alpha} = 1,79\%),$$

Значение α довольно близко к табличному значению для платины ($\alpha_{Pt}^{\text{табл}} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$).

4. Найдем коэффициенты теплопроводности воздуха при атмосферном давлении для наших температур:

$$k = \frac{dQ}{dT} \frac{\ln \frac{r_o}{r_1}}{2\pi L} = \frac{\frac{dR}{dT}}{\frac{dR}{dQ}} \frac{\ln \frac{r_o}{r_1}}{2\pi L}$$

$T, ^\circ\text{C}$	$k, \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\sigma_k, \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$\varepsilon_k, \%$
20	24.61	0.81	3.29
30	25.19	0.61	2.41
40	26.36	0.55	2.08
50	28.18	0.71	2.53
60	27.88	0.63	2.26
70	28.98	0.74	2.56

Таблица 8: Коэффициенты теплопроводности воздуха при атмосферном давлении для исследуемых температур

5. Построим график зависимости теплопроводности воздуха от температуры газа $k(T)$ в обычном и в двойном логарифмическом масштабах.

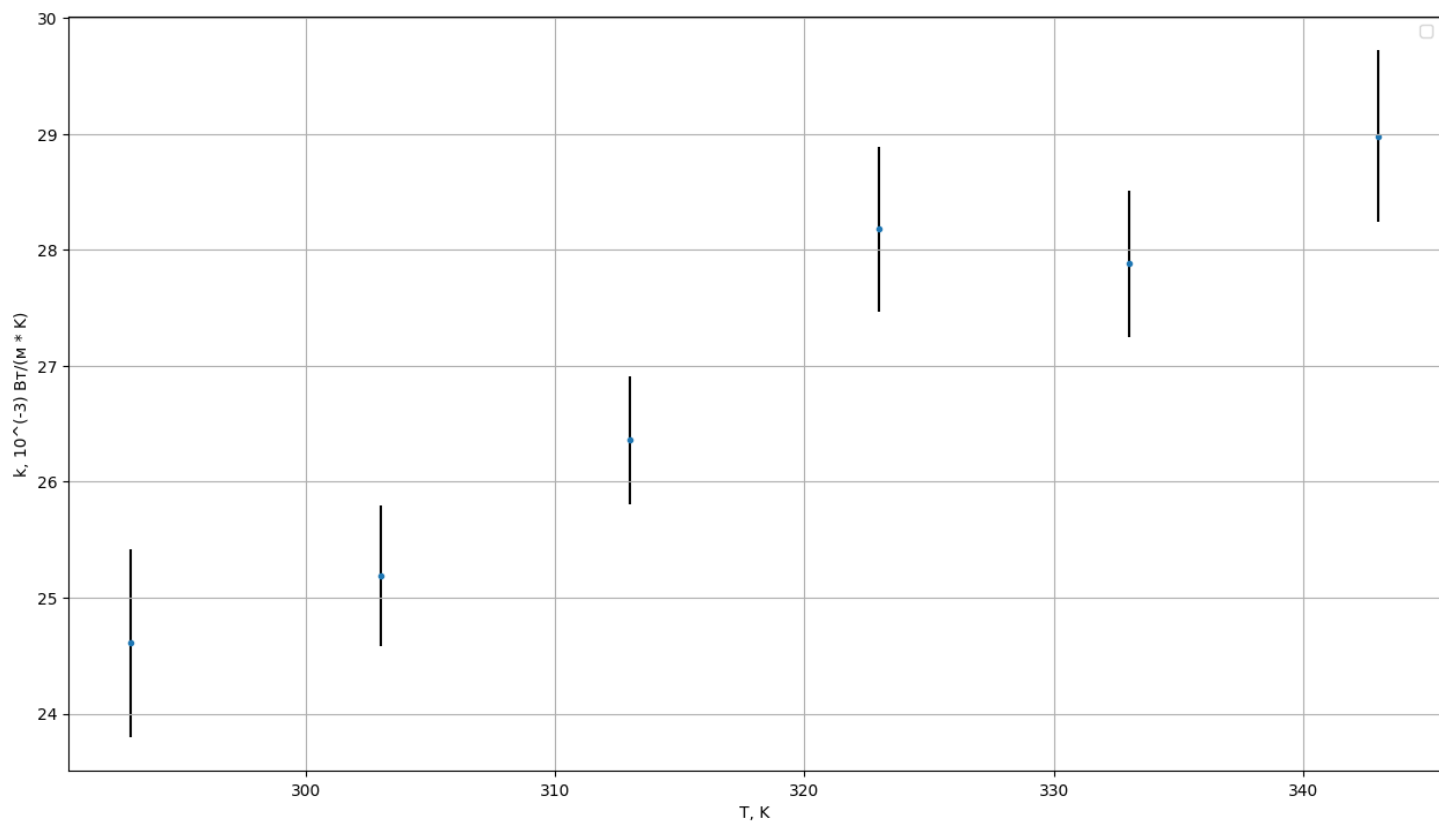


Рис. 6: График №3 Зависимость $k(T)$

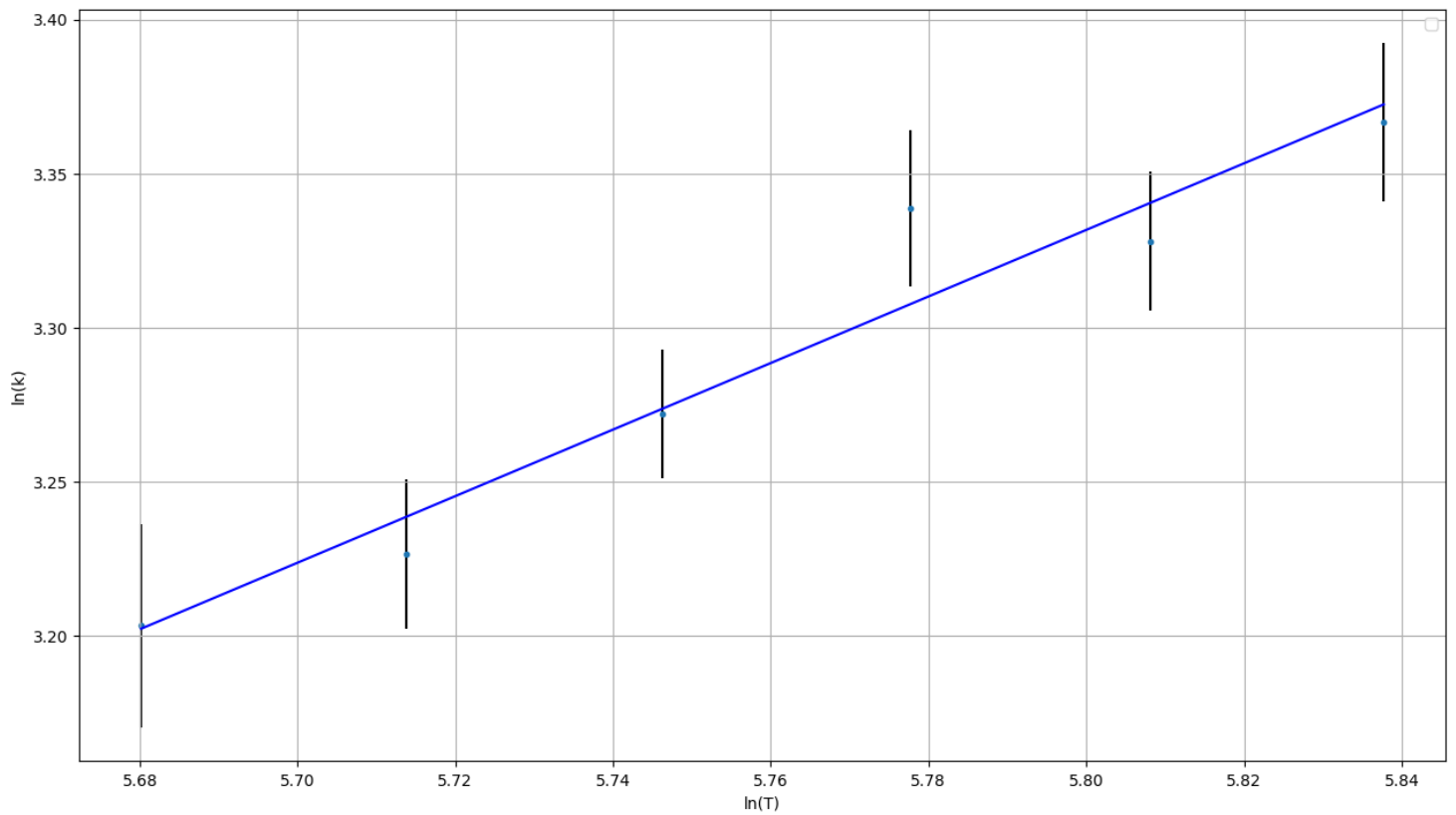


Рис. 7: График №4 Зависимость $k(T)$ в двойном логарифмическом масштабе

Предполагая, что коэффициент теплопроводности воздуха зависит степенным образом от абсолютной температуры: $k \sim T^\beta$, вычислим по графику №4 $\beta = 1.08 \pm 0.14$ ($\varepsilon_\beta = 12,96\%$). Теоретический коэффициент равен 0.5, поскольку $k \sim \lambda \bar{v} \cdot n c_V$, где $\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$.

8 Результаты и обсуждения

Сравним полученные экспериментально значения коэффициента теплопроводности воздуха при атмосферном давлении для исследуемых температур с табличными значениями. В таблице приведены вычисленные на основе данных из книги Лабораторный практикум по общей физике Том 1 Термодинамика и молекулярная физика.

$T, ^\circ\text{C}$	$k_{\text{эксп}}, \frac{\text{мВт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$k_{\text{теор}}, \frac{\text{мВт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$\sigma_k, \frac{\text{мВт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$\varepsilon_k, \%$
293	24.61	25.4	0.81	3.29
303	25.19	26.2	0.61	2.42
313	26.36	26.9	0.55	2.09
323	28.18	27.7	0.71	2.52
333	27.88	28.5	0.63	2.26
343	28.98	29.2	0.74	2.55

Таблица 9: Сравнение экспериментальных и табличных значений

Как мы видим, полученные значения с хорошей точностью совпадают с табличными. Выходит, что полученный по графику №4 показатель β , несмотря на сильное расхождение с теоретическим, для данного диапазона не сильно влияет на точность полученных значений.

В реальности эффективное сечение σ **уменьшается с ростом температуры**, потому что:

- Молекулы движутся быстрее,
- Время взаимодействия при столкновении меньше,
- Эффективный диаметр молекул уменьшается.

Если $\sigma(T) \sim T^{-\gamma}$ (где $\gamma > 0$), то:

$$\lambda \sim \frac{1}{n\sigma} \sim T \cdot T^\gamma = T^{1+\gamma}$$

Тогда:

$$k \sim \lambda \bar{v} \sim T^{1+\gamma} \cdot T^{1/2} = T^{3/2+\gamma}$$

Даже при малом $\gamma > 0$ показатель $\beta > 0,5$.

Вывод: Экспериментально полученное $\beta = 0,88$ превышает 0,5, что качественно согласуется с температурной зависимостью сечения столкновений, которая в классической модели твёрдых сфер не учитывается, но в реальных газах проявляется.

Таким образом: σ убывает с температурой, что приводит к более сильной зависимости $k(T)$, чем \sqrt{T} , поэтому можно сделать вывод, что показатель β должен быть больше $\frac{1}{2}$.

9 Выводы

1. В данной работе были измерены зависимости сопротивления платиновой нити от подаваемой на нее мощности при разных температурах. Построены графики зависимостей $R(Q)$, получены угловые коэффициенты $\frac{dR}{dQ}$ и сопротивления нити при данных температурах (при $Q \rightarrow 0$). Относительная погрешность величин мала из-за высокой точности приборов (в частности мультиметров)
2. при помощи полученных сопротивлений построили график зависимости сопротивления нити от ее температуры $R(T)$, вычислили температурный коэффициент сопротивления платиновой нити. $\alpha_{\text{эксп}} = 3,734 \pm 0,067, 10^{-3}\text{K}^{-1}$ ($\varepsilon_{\alpha} = 1,79\%$), $\alpha_{\text{табл}} = 3,8 \cdot 10^{-3}\text{K}^{-1}$. Значения отличаются на $0,066 \cdot 10^{-3}\text{K}^{-1}$ ($\varepsilon = 1,74\%$), поэтому экспериментальная величина довольно близка к табличной.
3. Вычислили коэффициенты теплопроводности воздуха при атмосферном давлении и разных температурах. Относительная погрешность коэффициента для каждой температуры не превосходит 3,29% (см. таблицу 9).
4. Предположив, что коэффициент теплопроводности зависит от температуры степенным образом, по графику зависимости $\ln k(\ln T)$ определили показатель. $\beta_{\text{эксп}} = 1,08 \pm 0,14$ ($\varepsilon_{\beta} = 12,96\%$), $\beta_{\text{теор}} = 0,5$. Значения сильно отличаются, однако исходя из таблицы 9, можно сделать вывод, что при показателе от 0,5 до 1,1 экспериментальные и теоретические значения коэффициентов теплопроводности не сильно расходятся.