

Лабораторная работа №2.2.3

«Измерение теплопроводности воздуха при атмосферном давлении»

Сирий Р. А.

01 апреля 2023 г.

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 (цифровые мультиметры)
- Эталонное сопротивление
- Источник постоянного напряжения
- Магазин сопротивлений

Ход работы

I. Теоретическое введение

Рассмотрим стационарную теплопроводность в цилиндрической геометрии (см. **рис. 1**). Пусть тонкая нить радиусом r_1 и длиной L помещена на оси цилиндра радиусом r_0 . Температура стенок цилиндра T_0 поддерживается постоянной. Пусть в нити выделяется некоторая тепловая мощность Q [Вт]. Если цилиндр длинный ($L \gg r_0$), можно пренебречь теплоотводом через его торцы. Тогда все параметры газа можно считать зависящими только от расстояния до оси системы r , а поток тепла \vec{q} направленным строго радиально. Закон Фурье для нашей системы имеет вид

$$q = -\kappa \frac{dT}{dr}. \quad (1)$$

В стационарном состоянии полный поток тепла через любую цилиндрическую поверхность радиуса r площадью $S = 2\pi rL$ должен быть одинаков и равен $Q = qS$:

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

Если перепад температуры $\Delta T = T_1 - T_0$ между нитью и стенками цилиндра мал ($\Delta T \ll T_0$), то в (4) можно пренебречь изменением теплопроводности от температуры в пределах системы, положив $\kappa \approx \kappa(T_0)$. Тогда разделяя переменные в (2) и интегрируя от радиуса нити до радиуса колбы, получим

$$Q = \frac{2\pi L}{\ln r_0/r_1} \kappa \Delta T. \quad (3)$$

II. Описание установки и методики измерений

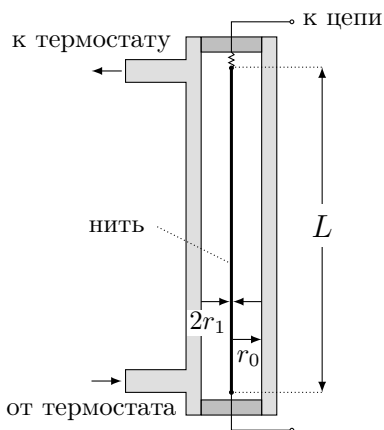
Схема установки приведена на **рис. 2**. На оси полой цилиндрической трубки с внутренним диаметром $2r_0 \approx 2$ см размещена металлическая нить диаметром $2r_1 \approx 0.05$ мм и длиной $L \approx 40$ см (материал нити и точные геометрические размеры указаны в техническом описании установки). Полость 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:

$$Q = UI, \quad (4)$$

и сопротивление нити по закону Ома:

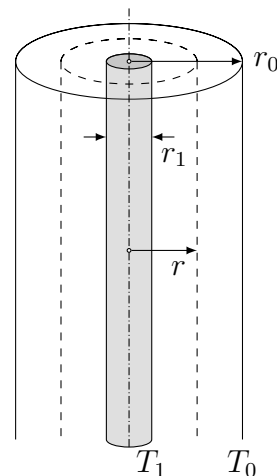
$$R = \frac{U}{I}. \quad (5)$$

Рис. 2: Схема установки



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. Для большинства металлов изменение сопротивления из-за нагрева невелико: при изменении температуры на $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ относительное изменение сопротивления нити $\frac{\Delta R}{R}$ может составлять приблизительно от 0.2% до 0.6% (в зависимости от её материала). Следовательно, измерение R важно провести с высокой точностью. Желательно, чтобы методика измерений и чувствительность приборов обеспечивали измерение тока и напряжения с относительной погрешностью, не превышающей 0.1% (т.е. необходимо уверенно измерять 4–5 значащих цифр, что вполне реально при использовании современных цифровых мультиметров).

Рис. 1: Геометрия задачи



На **рис. 3** приведена электрическая схема установки. Для измерения напряжения и тока используется два мультиметра, работающие в режимах вольтметра и амперметра соответственно. Подключение к нити R_n 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. Сопротивление R_s используется в качестве балластного для предотвращения перегорания нити. 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 $R_n \approx 10$ Ом вносит относительную ошибку не более 10^{-5} . Ток в цепи в обеих схемах регулируется с помощью магазина сопротивлений R_m , включённого последовательно с источником напряжения. В исследуемом интервале температур (20–80 °C) зависимость сопротивления от температуры можно с хорошей точностью аппроксимировать линейной функцией:

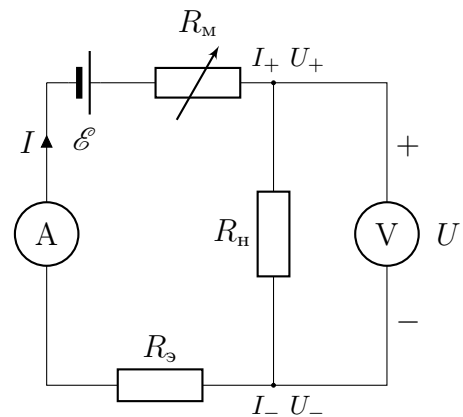
$$R(t) = R_{273} \cdot (1 + \alpha t), \quad (6)$$

где t — температура в [°C], R_{273} — сопротивление нити при температуре 0 °C и

$$\alpha = \frac{1}{R_{273}} \frac{dR}{dT} \quad (7)$$

— температурный коэффициент сопротивления материала. Измерение зависимости (6) по данным для $Q \rightarrow 0$ позволит затем определять температуру нити t по значению её сопротивления R при произвольной мощности нагрева.

Рис. 3: Электрическая схема для измерения нагрузочной кривой



III. Пиво «Невское»

Вывод

Sed commodum posuere pede. Mauris ut est. Ut quis purus. Sed ac odio. Sed vehicula hendrerit sem. Duis non odio. Morbi ut dui. Sed accumsan risus eget odio. In hac habitasse platea dictumst. Pellentesque non elit. Fusce sed justo eu urna porta tincidunt. Mauris felis odio, sollicitudin sed, volutpat a, ornare ac, erat. Morbi quis dolor. Donec pellentesque, erat ac sagittis semper, nunc dui lobortis purus, quis congue purus metus ultricies tellus. Proin et quam. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos hymenaeos. Praesent sapien turpis, fermentum vel, eleifend faucibus, vehicula eu, lacus.

№	$T, ^\circ C$	$I, \text{мА}$	$U, \text{мВ}$	$R_{\text{м}}, \text{Ом}$	$Q, \text{мкВт}$	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$
1	23.5 ± 0.1	41.12 ± 0.02	834.0 ± 2.0	60.3 ± 0.01	34294.0 ± 84.0	20.282 ± 0.05
2		56.29 ± 0.02	1151.0 ± 2.0	36.8 ± 0.01	64790.0 ± 110.0	20.448 ± 0.036
3		67.2 ± 0.02	1384.0 ± 2.0	26.4 ± 0.01	93000.0 ± 140.0	20.595 ± 0.03
4		70.06 ± 0.02	1578.0 ± 2.0	20.1 ± 0.01	110550.0 ± 140.0	22.524 ± 0.029
5		83.29 ± 0.02	1739.0 ± 2.0	15.9 ± 0.01	144840.0 ± 170.0	20.879 ± 0.025
6		89.54 ± 0.02	1880.0 ± 2.0	12.8 ± 0.01	168340.0 ± 180.0	20.996 ± 0.023
7		95.22 ± 0.02	2011.0 ± 2.0	10.3 ± 0.01	191490.0 ± 190.0	21.12 ± 0.021
8		99.99 ± 0.02	2123.0 ± 2.0	8.4 ± 0.01	212280.0 ± 200.0	21.232 ± 0.02
9		104.37 ± 0.02	2227.0 ± 2.0	6.8 ± 0.01	232430.0 ± 210.0	21.338 ± 0.02
10		108.51 ± 0.02	2327.0 ± 2.0	5.4 ± 0.01	252500.0 ± 220.0	21.445 ± 0.019

Таблица 1: Измерения при $T = 23.5 ^\circ C$

№	$T, ^\circ C$	$I, \text{мА}$	$U, \text{мВ}$	$R_{\text{м}}, \text{Ом}$	$Q, \text{мкВт}$	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$
1	35.0 ± 0.1	40.72 ± 0.02	859.0 ± 2.0	60.3 ± 0.01	34978.0 ± 83.0	21.095 ± 0.05
2		55.57 ± 0.02	1181.0 ± 2.0	36.8 ± 0.01	65630.0 ± 110.0	21.252 ± 0.037
3		66.19 ± 0.02	1416.0 ± 2.0	26.4 ± 0.01	93730.0 ± 140.0	21.393 ± 0.031
4		74.76 ± 0.02	1611.0 ± 2.0	20.1 ± 0.01	120440.0 ± 150.0	21.549 ± 0.027
5		81.77 ± 0.02	1772.0 ± 2.0	15.9 ± 0.01	144900.0 ± 170.0	21.671 ± 0.025
6		87.79 ± 0.02	1912.0 ± 2.0	12.8 ± 0.01	167850.0 ± 180.0	21.779 ± 0.023
7		93.25 ± 0.02	2042.0 ± 2.0	10.3 ± 0.01	190420.0 ± 190.0	21.898 ± 0.022
8		97.85 ± 0.02	2154.0 ± 2.0	8.4 ± 0.01	210770.0 ± 200.0	22.013 ± 0.021
9		102.08 ± 0.02	2256.0 ± 2.0	6.8 ± 0.01	230290.0 ± 210.0	22.1 ± 0.02
10		106.03 ± 0.02	2354.0 ± 2.0	5.4 ± 0.01	249590.0 ± 220.0	22.201 ± 0.019

Таблица 2: Измерения при $T = 35 ^\circ C$

№	$T, ^\circ C$	$I, \text{мА}$	$U, \text{мВ}$	$R_{\text{м}}, \text{Ом}$	$Q, \text{мкВт}$	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$
1	45.0 ± 0.1	40.39 ± 0.02	881.0 ± 2.0	60.3 ± 0.01	35584.0 ± 83.0	21.812 ± 0.051
2		54.96 ± 0.02	1207.0 ± 2.0	36.8 ± 0.01	66340.0 ± 110.0	21.961 ± 0.037
3		65.34 ± 0.02	1444.0 ± 2.0	26.4 ± 0.01	94350.0 ± 130.0	22.1 ± 0.031
4		73.69 ± 0.02	1638.0 ± 2.0	20.1 ± 0.01	120700.0 ± 150.0	22.228 ± 0.028
5		80.49 ± 0.02	1799.0 ± 2.0	15.9 ± 0.01	144800.0 ± 160.0	22.351 ± 0.025
6		86.33 ± 0.02	1939.0 ± 2.0	12.8 ± 0.01	167390.0 ± 180.0	22.46 ± 0.024
7		91.64 ± 0.02	2069.0 ± 2.0	10.3 ± 0.01	189600.0 ± 190.0	22.577 ± 0.022
8		96.07 ± 0.02	2179.0 ± 2.0	8.4 ± 0.01	209340.0 ± 200.0	22.681 ± 0.021
9		100.15 ± 0.02	2281.0 ± 2.0	6.8 ± 0.01	228440.0 ± 210.0	22.776 ± 0.02
10		103.98 ± 0.02	2378.0 ± 2.0	5.4 ± 0.01	247260.0 ± 210.0	22.87 ± 0.02

Таблица 3: Измерения при $T = 45 ^\circ C$

№	$T, ^\circ C$	$I, \text{мА}$	$U, \text{мВ}$	$R_{\text{м}}, \text{Ом}$	$Q, \text{мкВт}$	$R_{\text{н}}, \text{Ом}$
1	55.0 ± 0.1	40.07 ± 0.02	902.0 ± 2.0	60.3 ± 0.01	36143.0 ± 82.0	22.511 ± 0.051
2		54.38 ± 0.02	1232.0 ± 2.0	36.8 ± 0.01	67000.0 ± 110.0	22.655 ± 0.038
3		64.51 ± 0.02	1470.0 ± 2.0	26.4 ± 0.01	94830.0 ± 130.0	22.787 ± 0.032
4		72.64 ± 0.02	1666.0 ± 2.0	20.1 ± 0.01	121020.0 ± 150.0	22.935 ± 0.028
5		79.26 ± 0.02	1826.0 ± 2.0	15.9 ± 0.01	144730.0 ± 160.0	23.038 ± 0.026
6		84.93 ± 0.02	1966.0 ± 2.0	12.8 ± 0.01	166970.0 ± 170.0	23.148 ± 0.024
7		90.08 ± 0.02	2095.0 ± 2.0	10.3 ± 0.01	188720.0 ± 180.0	23.257 ± 0.023
8		94.37 ± 0.02	2203.0 ± 2.0	8.4 ± 0.01	207900.0 ± 190.0	23.344 ± 0.022
9		98.31 ± 0.02	2304.0 ± 2.0	6.8 ± 0.01	226510.0 ± 200.0	23.436 ± 0.021
10		101.99 ± 0.02	2399.0 ± 2.0	5.4 ± 0.01	244670.0 ± 210.0	23.522 ± 0.02

Таблица 4: Измерения при $T = 55 ^\circ C$

№	$T, ^\circ C$	$I, \text{мА}$	$U, \text{мВ}$	$R_M, \text{Ом}$	$Q, \text{мкВт}$	$R_H, \text{Ом}$
1	70.0 ± 0.1	39.61 ± 0.02	933.0 ± 2.0	60.3 ± 0.01	36956.0 ± 81.0	23.555 ± 0.052
2		53.52 ± 0.02	1269.0 ± 2.0	36.8 ± 0.01	67920.0 ± 110.0	23.711 ± 0.038
3		63.32 ± 0.02	1509.0 ± 2.0	26.4 ± 0.01	95550.0 ± 130.0	23.831 ± 0.032
4		71.15 ± 0.02	1704.0 ± 2.0	20.1 ± 0.01	121240.0 ± 150.0	23.949 ± 0.029
5		77.49 ± 0.02	1865.0 ± 2.0	15.9 ± 0.01	144520.0 ± 160.0	24.068 ± 0.027
6		82.91 ± 0.02	2004.0 ± 2.0	12.8 ± 0.01	166150.0 ± 170.0	24.171 ± 0.025
7		87.84 ± 0.02	2131.0 ± 2.0	10.3 ± 0.01	187190.0 ± 180.0	24.26 ± 0.023
8		91.9 ± 0.02	2238.0 ± 2.0	8.4 ± 0.01	205670.0 ± 190.0	24.353 ± 0.022
9		95.65 ± 0.02	2338.0 ± 2.0	6.8 ± 0.01	223630.0 ± 200.0	24.443 ± 0.022
10		99.19 ± 0.02	2432.0 ± 2.0	5.4 ± 0.01	241230.0 ± 200.0	24.519 ± 0.021

Таблица 5: Измерения при $T = 70 ^\circ C$

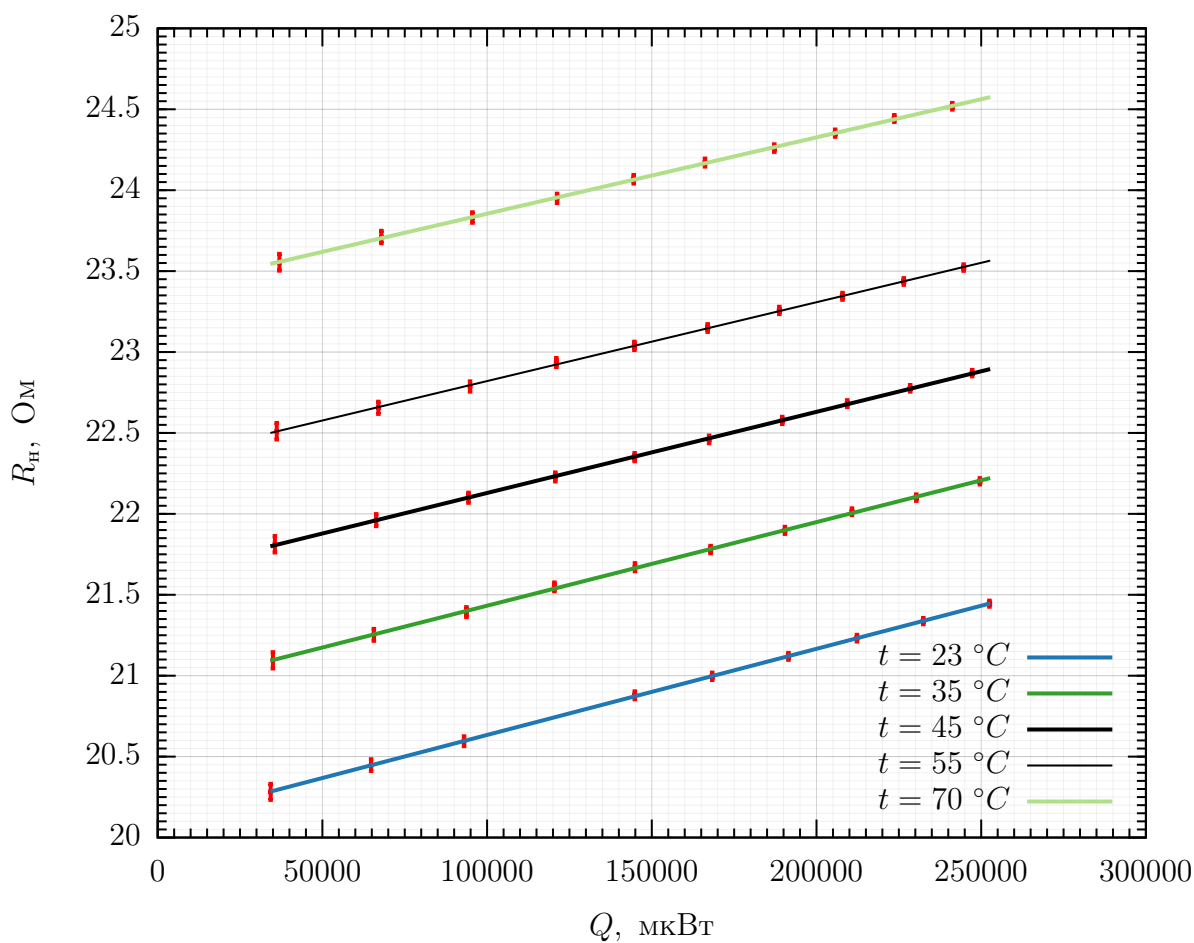


Рис. 4: Нагрузочные кривые

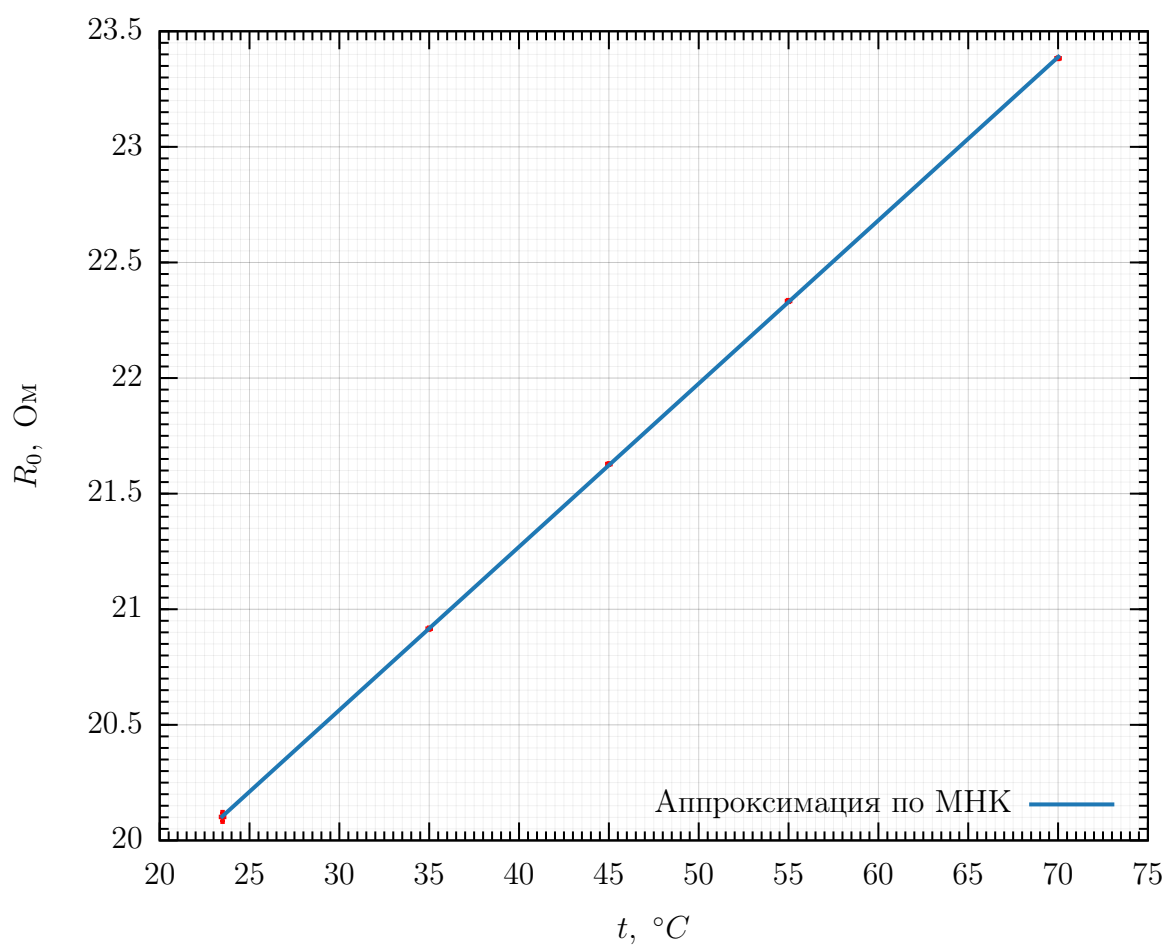


Рис. 5: $R_0(t)$