

Работа 2.2.3

Измерение теплопроводности воздуха при атмосферном давлении

Валеев Рауф Раушанович
группа 825

28 апреля 2019 г.

Теоретическая справка

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:

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

С помощью некоторых преобразований мы получаем, что

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

Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 1. На оси полой цилиндрической трубы с внутренним диаметром $2r_1 \sim 1$ 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 трубы расположены 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.

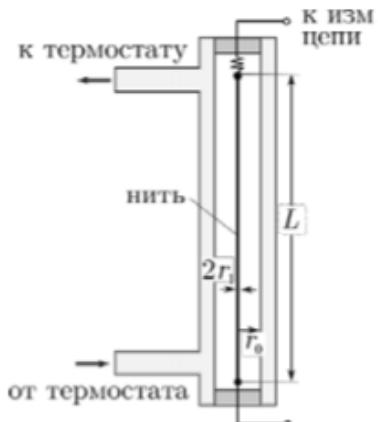


Рис. 1: Схема установки

На рис. 2 представлена схема электрической установки:

Схема рис. 2 предусматривает использование одного вольтметра и эталонного сопротивления $R_3 \sim 10 \text{ Ом}$ (точное значение R_3 и его класс точности указаны в техническом описании установки), включённого последовательно с нитью. В положении переключателя 2 вольтметр измеряет напряжение на нити, а в положении 1 — напряжение на R_3 , пропорциональное току через нить. Для исключения влияния контактов и подводящих проводов эталонное сопротивление R_3 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.

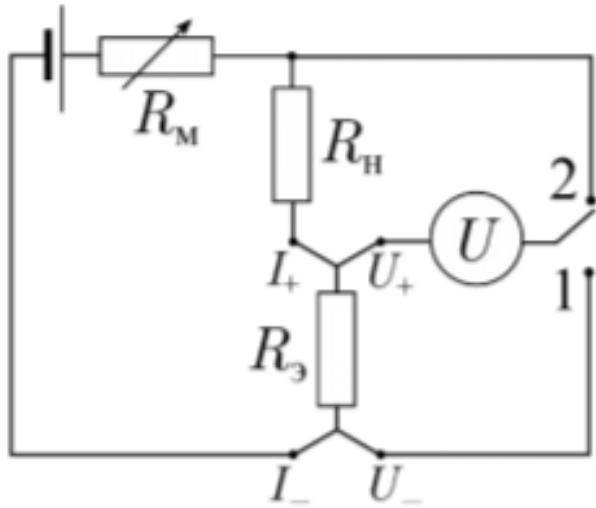


Рис. 2: Электрическая схема измерения сопротивления нити и мощности нагрева

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 ($20\text{-}70 \text{ }^{\circ}\text{C}$) зависимость сопротивления от температуры можно с хорошей точностью аппроксимировать линейной функцией:

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

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

Ход работы

1. При комнатной температуре термостата измеряем зависимость сопротивления нити $R = \frac{U}{I}$ от подаваемой на неё мощности $Q = UI$ - нагрузочную кривую $R(Q)$.

Измерения проводим для 7-9 различных значений силы тока через нить от 0 до I_{max} .

$T = 25^{\circ}C$			
$Q, 10^{-6}$ Дж	$\sigma_Q, 10^{-6}$ Дж	R, Ω	σ_R, Ω
0,0143	0,0001	11	0,01
0,0174	0,0001	11,03	0,01
0,0211	0,0001	11,05	0,01
0,0268	0,0001	11,06	0,01
0,0348	0,0001	11,11	0,01
0,0471	0,0001	11,14	0,01
0,0670	0,0001	11,16	0,01
0,1033	0,0001	11,19	0,01
0,1806	0,0001	11,20	0,01

Таблица 1: Данные для комнатной температуры

2. Проводим измерения нагрузочных кривых согласно п. 1 для 5–7 температур термостата в диапазоне от комнатной до $70^{\circ}C$.

$T = 35^{\circ}C$			
$Q, 10^{-6}$ Дж	$\sigma_Q, 10^{-6}$ Дж	R, Ω	σ_R, Ω
0,0149	0,0001	11,09	0,01
0,0180	0,0001	11,14	0,01
0,0221	0,0001	11,14	0,01
0,0280	0,0001	11,20	0,01
0,0363	0,0001	11,193	0,01
0,0491	0,0001	11,22	0,01
0,0703	0,0001	11,27	0,01
0,1086	0,0001	11,32	0,01
0,1898	0,0001	11,34	0,01

Таблица 2: Данные для $T = 35^{\circ}C$

$T = 45^0C$			
$Q, 10^{-6}$ Дж	$\sigma_Q, 10^{-6}$ Дж	R, Ω	σ_R, Ω
0,0153	0,0001	11,51	0,01
0,0185	0,0001	11,52	0,01
0,0229	0,0001	11,57	0,01
0,0288	0,0001	11,58	0,01
0,0379	0,0001	11,67	0,01
0,0507	0,0001	11,68	0,01
0,0724	0,0001	11,69	0,01
0,1121	0,0001	11,70	0,01
0,1960	0,0001	11,71	0,01

Таблица 3: Данные для $T = 45^0C$

$T = 55^0C$			
$Q, 10^{-6}$ Дж	$\sigma_Q, 10^{-6}$ Дж	R, Ω	σ_R, Ω
0,0159	0,0001	11,95	0,01
0,0191	0,0001	11,95	0,01
0,0236	0,0001	11,96	0,01
0,0301	0,0001	11,98	0,01
0,0386	0,0001	11,99	0,01
0,0524	0,0001	12,00	0,01
0,0749	0,0001	12,00	0,01
0,1157	0,0001	12,05	0,01
0,2019	0,0001	12,10	0,01

Таблица 4: Данные для $T = 55^0C$

$T = 65^{\circ}C$			
$Q, 10^{-6}$ Дж	$\sigma_Q, 10^{-6}$ Дж	R, Ω	σ_R, Ω
0,0165	0,0001	12,30	0,01
0,0198	0,0001	12,35	0,01
0,0243	0,0001	12,37	0,01
0,0307	0,0001	12,39	0,01
0,0400	0,0001	12,39	0,01
0,0543	0,0001	12,42	0,01
0,0776	0,0001	12,43	0,01
0,1198	0,0001	12,47	0,01
0,2089	0,0001	12,50	0,01

Таблица 5: Данные для $T = 65^{\circ}C$

$T = 70^{\circ}C$			
$Q, 10^{-6}$ Дж	$\sigma_Q, 10^{-6}$ Дж	R, Ω	σ_R, Ω
0,0206	0,0001	12,65	0,01
0,0254	0,0001	12,76	0,01
0,0321	0,0001	12,77	0,01
0,0419	0,0001	12,77	0,01
0,0569	0,0001	12,79	0,01
0,0819	0,0001	12,80	0,01
0,1280	0,0001	12,80	0,01
0,2336	0,0001	13,11	0,01

Таблица 6: Данные для $T = 70^{\circ}C$

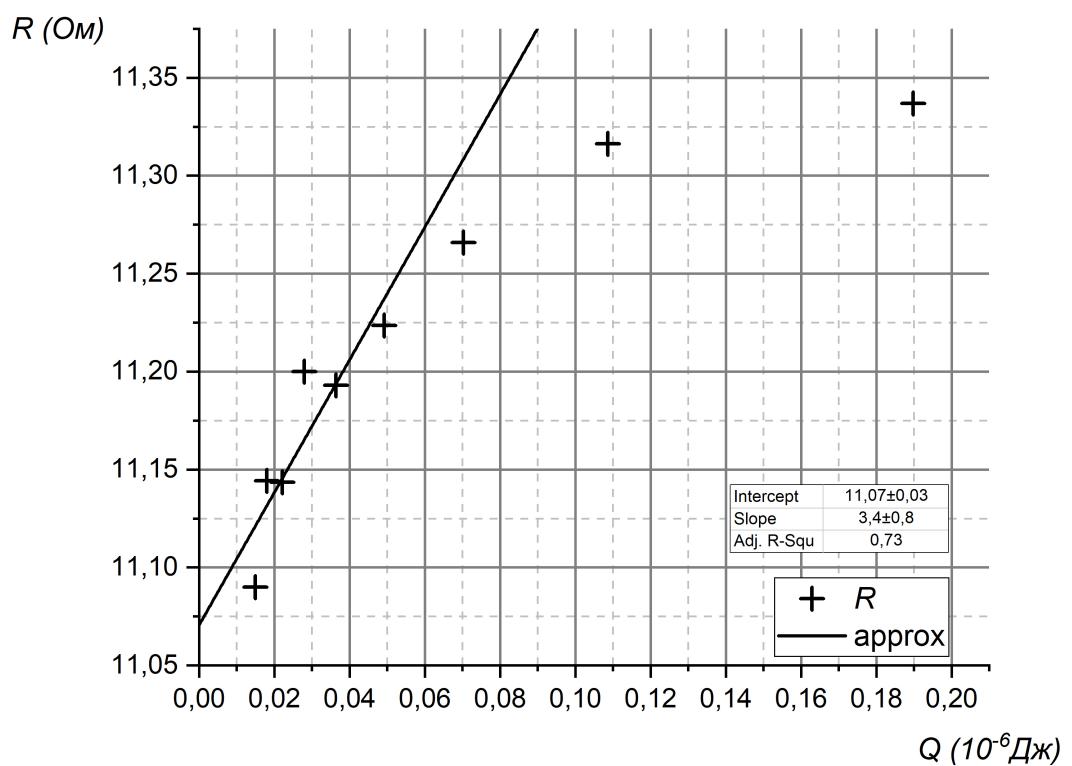


Рис. 3: График для $T = 25^{\circ}\text{C}$

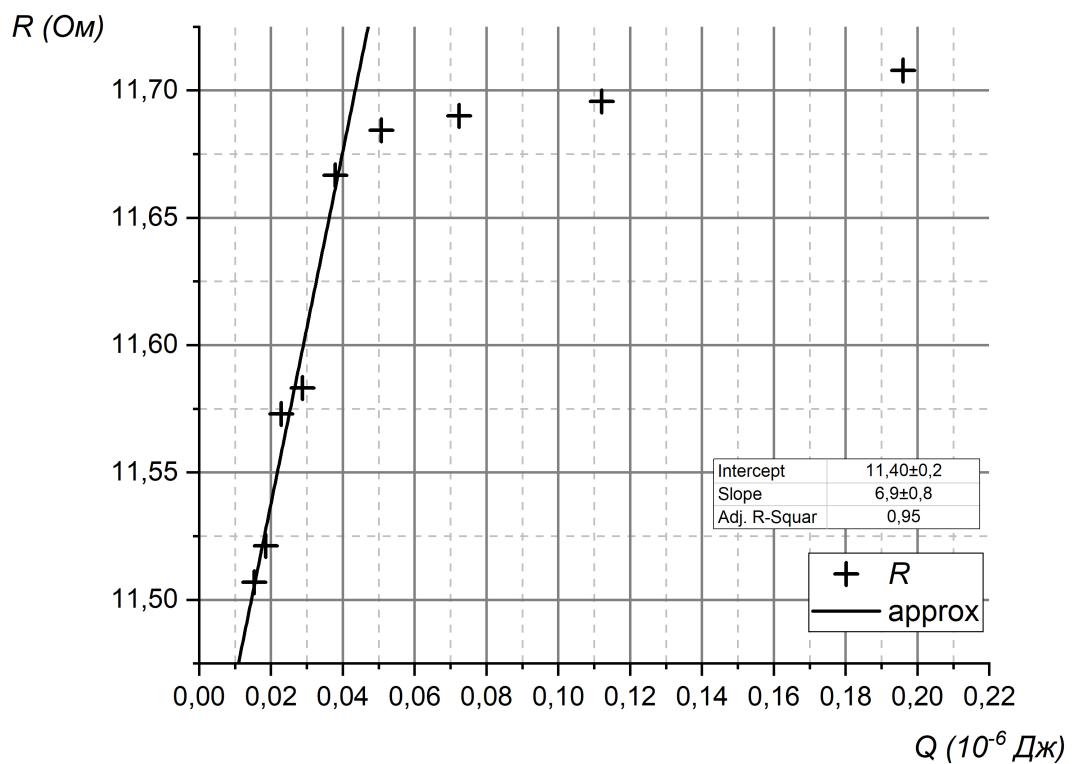


Рис. 4: График для $T = 35^{\circ}\text{C}$

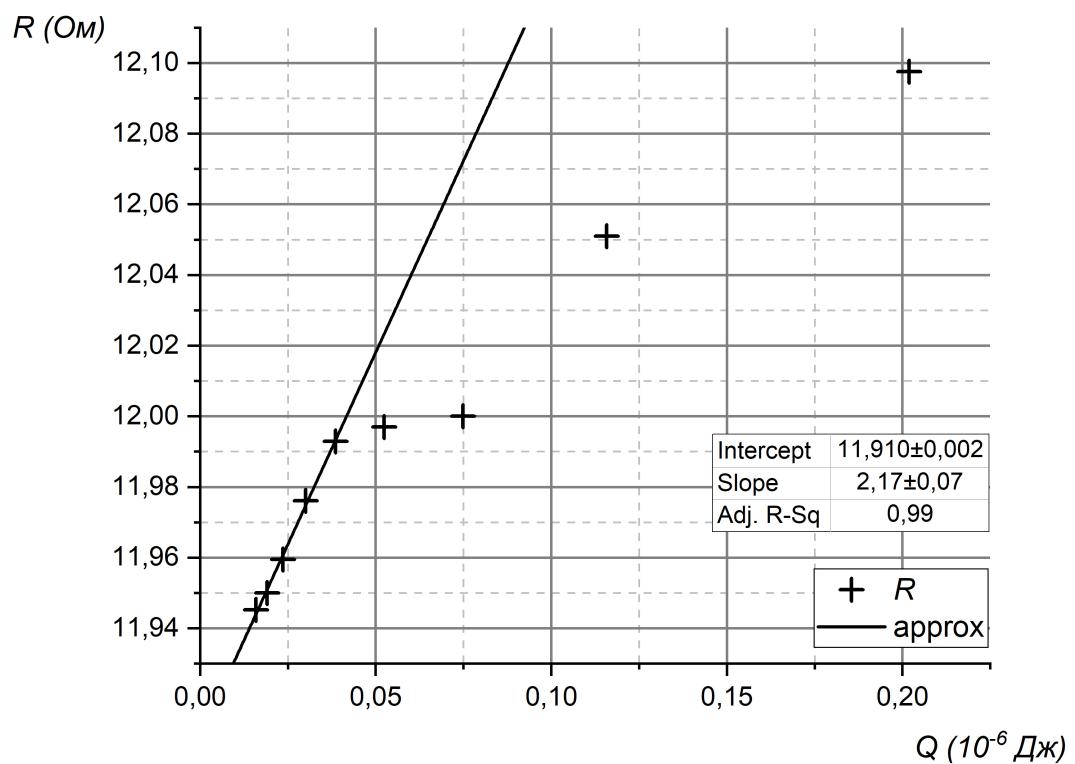


Рис. 5: График для $T = 45^0C$

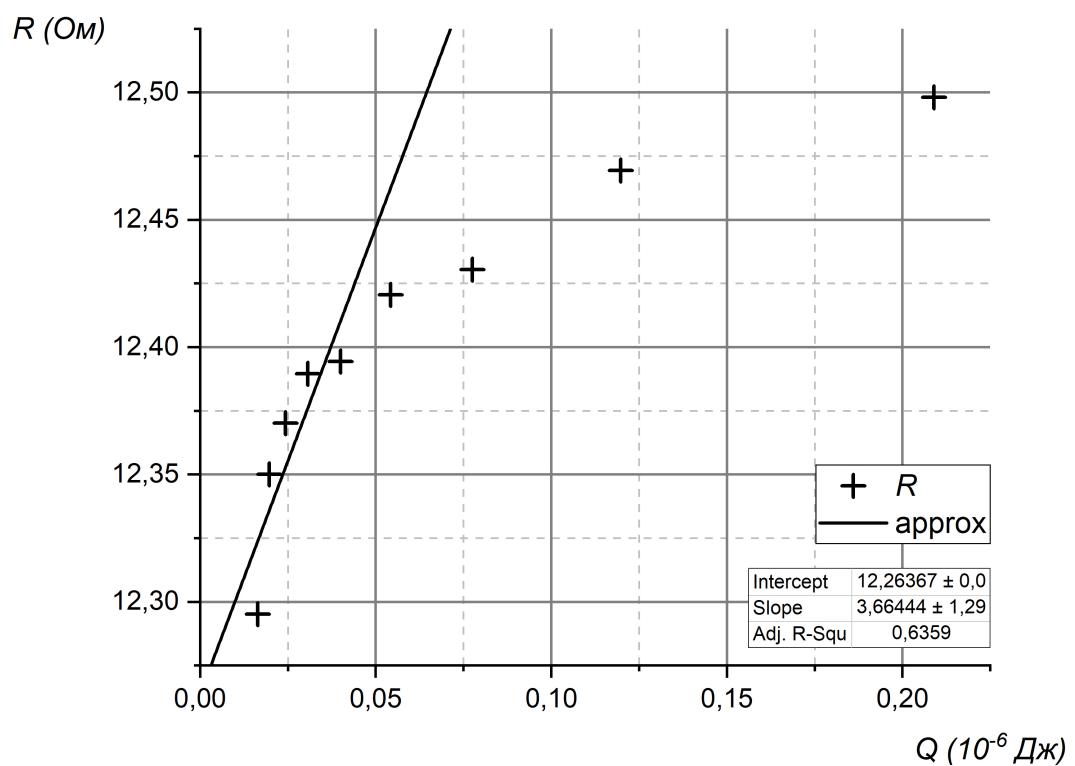


Рис. 6: График для $T = 55^\circ C$

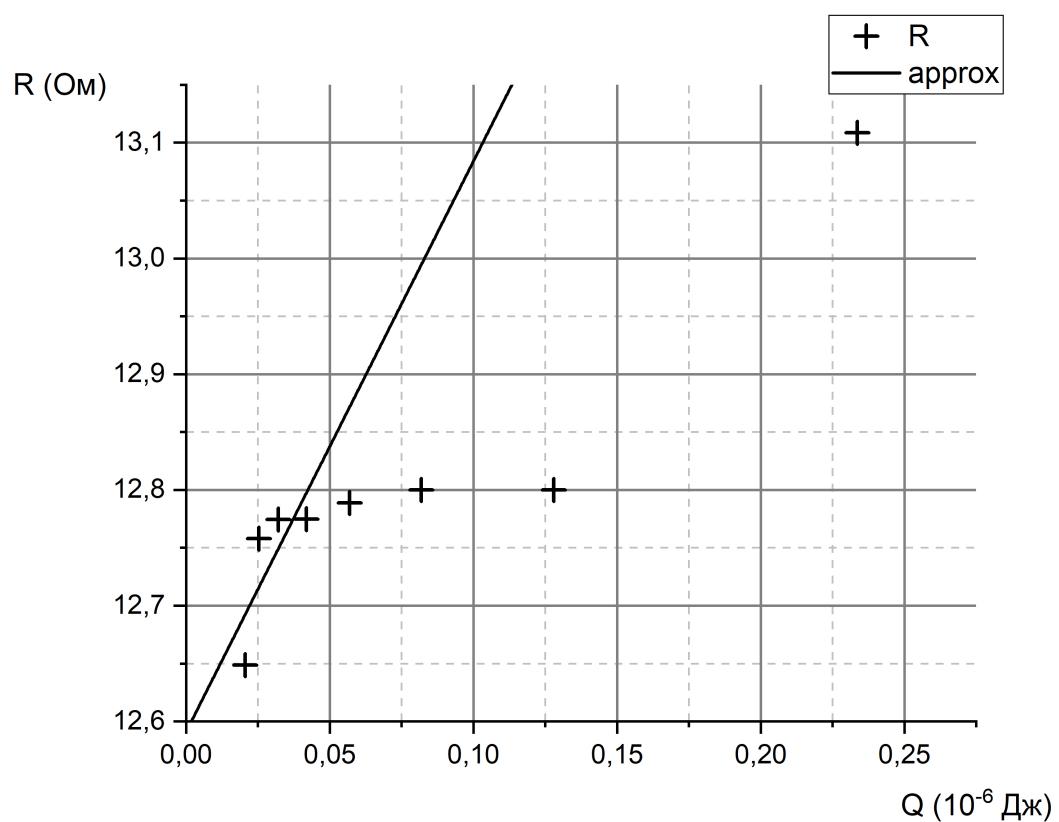


Рис. 7: График для $T = 65^{\circ}\text{C}$

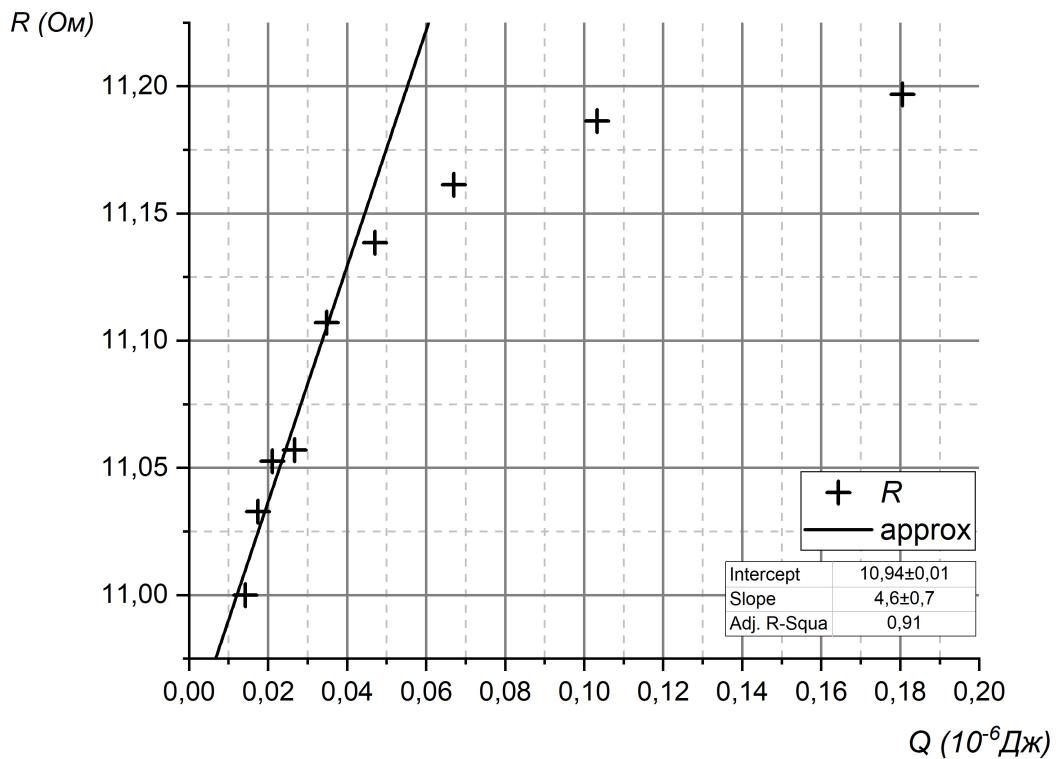


Рис. 8: График для $T = 70^{\circ}\text{C}$

3. теперь обработаем результаты, запишем все наклоны и R_0 из графиков в одну таблицу

$T, \text{К}$	$dR/dQ, \text{Ом}/\text{Дж}$	$\sigma_{dR/dQ}, \text{Ом}/\text{Дж}$	$R_0, \text{Ом}$	$\sigma_{R_0}, \text{Ом}$
298	3,4	0,8	11,07	0,03
308	6,9	0,8	11,4	0,2
318	2,17	0,07	11,910	0,002
328	3,7	1,3	12,27	0,01
338	4,6	1	12,6	0,1

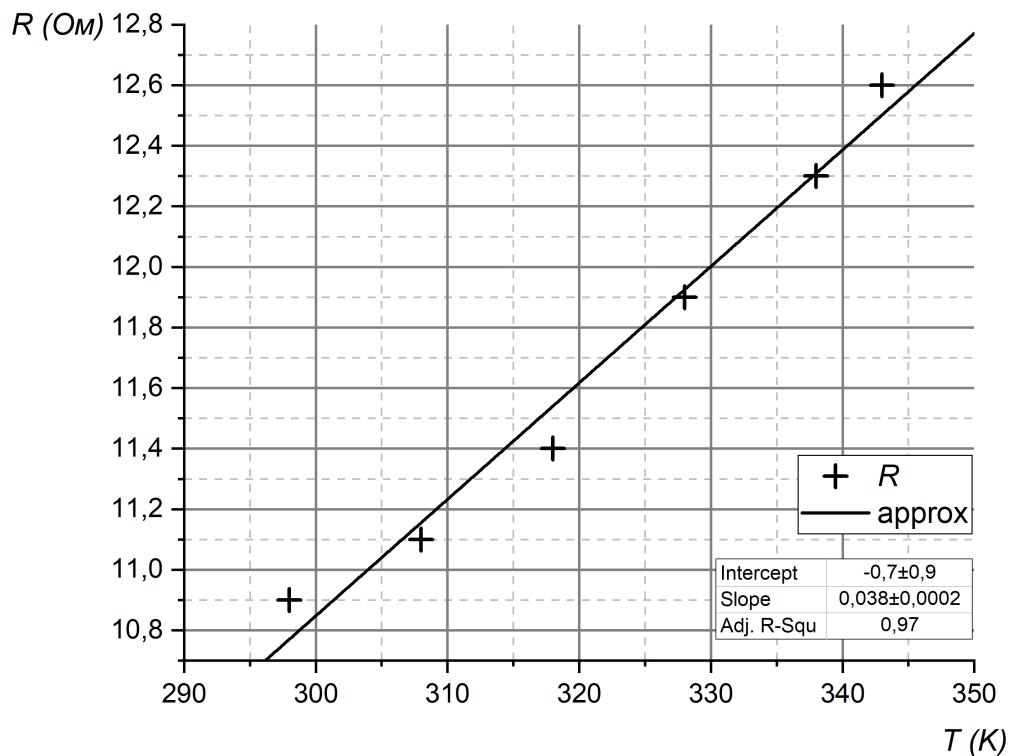


Рис. 9: График $R(T)$

T , К	dR/dQ , Ом/Дж	R_0 , Ом	σ_{R_0} , Ом	$(dR/dT)/(dR/dQ)$, Дж/К	k , Вт/м К	σ_k , Вт/м К
298	3,4	11,07	0,03	0,011	0,023	0,002
308	6,9	11,4	0,2	0,006	0,012	0,002
318	2,17	11,91	0,002	0,018	0,037	0,002
328	3,7	12,27	0,01	0,010	0,022	0,002
338	4,6	12,6	0,1	0,008	0,017	0,002

Таблица 7: Таблица k