

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

# Определение теплопроводности воздуха при атмосферном давлении

Автор:  
Шахматов Андрей Юрьевич  
Б02-304

Долгопрудный 2024

## Аннотация

Исследована зависимость теплопроводности воздуха в диапазоне температур  $20 - 80^\circ\text{C}$ . Получена эмпирическая зависимость коэффициента теплопроводности  $\kappa$  от температуры  $T$ :  $\kappa = AT$ .

## Содержание

|  |          |
|--|----------|
| <b>1 Введение</b>  | <b>1</b> |
| <b>2 Методика</b>  | <b>1</b> |
| <b>3 Результаты и их обсуждение</b>                      | <b>1</b> |
| <b>4 Выводы</b>  | <b>5</b> |
| <b>5 Используемая литература</b>                         | <b>5</b> |
| <b>6 Приложения</b>                                      | <b>6</b> |
| 6.1 Параметры установки и погрешности приборов . . . . . | 6        |
| 6.2 Данные результатов измерений . . . . .               | 6        |

## 1 Введение

Цель настоящей работы заключалась в определении коэффициента теплопроводности воздуха при различных температурах.

## 2 Методика

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

## 3 Результаты и их обсуждение

Для каждой из температур термостата измерены зависимости напряжения  $U$  и силы тока  $I$  на нагрузке  $R_n$  (Приложение 6.2, Таблицы 1 - 7). Рассчитаны зависимости сопротивления нагрузки  $R_n = \frac{U}{I}$  от мощности, выделяемой на ней  $Q = UI$ . Для каждой из температур из графиков зависимости сопротивления нагрузки  $R_n(Q)$  (Рис. 1) определены коэффициенты наклона нагрузочных кривых  $\beta = \frac{dR}{dQ}$  и температуры нагрузки при температуре термостата  $R_0$  (Таблица 8). Зависимости  $R_n(Q)$  оказались линейными, что даёт подтверждение корректности используемой модели.

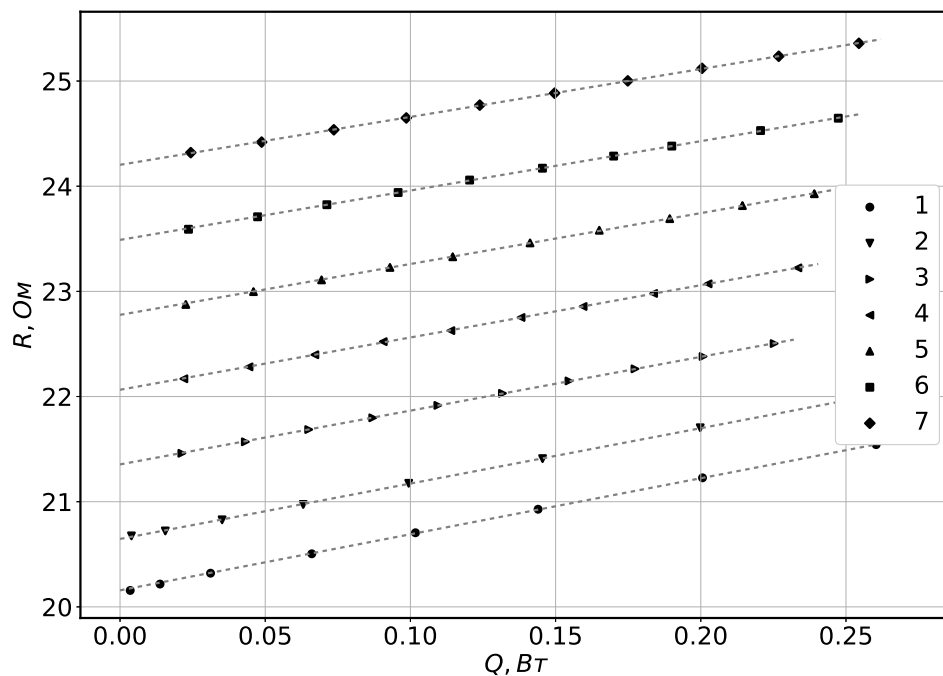


Рис. 1: Зависимость сопротивления нагрузки  $R_n$  от мощности  $Q$ , выделяющейся на ней, при различных температурах. Цифрами обозначены данные для каждой из температур: 1 - 23 °C, 2 - 30 °C, 3 - 40 °C, 4 - 50 °C, 5 - 60 °C, 6 - 70 °C, 7 - 80 °C. Кресты погрешности малы по сравнению с масштабом графика и потому не были нанесены.

Построены графики зависимости сопротивления нагрузки  $R_0$  от температуры  $T$  (Рис. 2). Полученный зависимость оказалась линейной, что подтверждает корректность использования формулы 1.

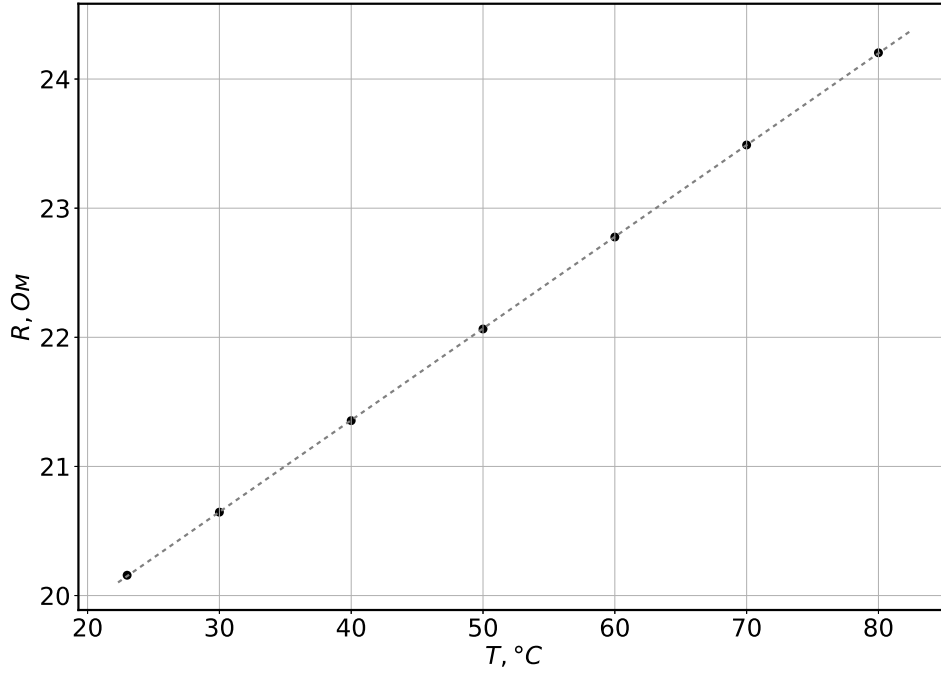


Рис. 2: Зависимость сопротивления нагрузки  $R_0$  от температуры  $T$ . Кресты погрешности малы по сравнению с масштабом графика и потому не были нанесены.

Рассчитаны сопротивление нагрузки  $R_{273} = (1.852 \pm 0.004) \cdot 10^1$  Ом и температурный коэффициент сопротивления материала  $\alpha = (3.836 \pm 0.010) \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ . Согласно формуле ?? найдено значение теплопроводности для различных температур (Таблица 9), где  $\frac{dQ}{d(\Delta T)} = \frac{dR}{dT} / \frac{dR}{dQ}$ . С учётом предположенной зависимости, имеющий вид  $\kappa = AT^n$  построим логарифмическую зависимость  $\ln \kappa = n \ln T + \ln A$  (Рис. 3).

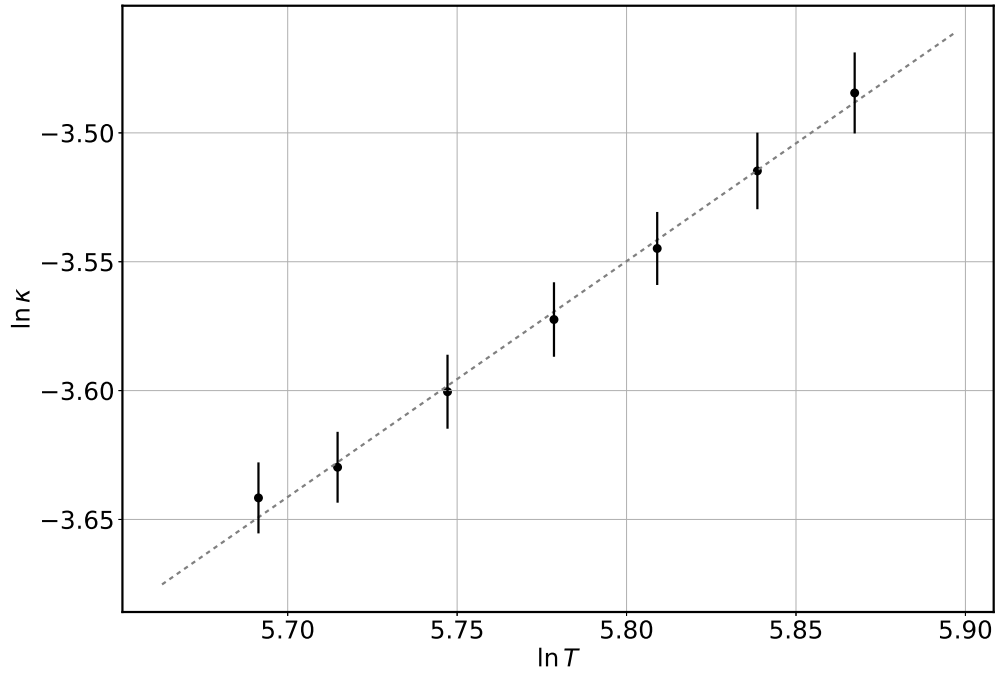


Рис. 3: Зависимость коэффициента теплопроводности воздуха  $\kappa$  от абсолютной температуры  $T$  в логарифмическом масштабе.

Полученные коэффициенты оказались равны  $\ln A = (-8.9 \pm 0.4)$ ,  $n = (9.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-1} \approx 1$ . По полученным значениям построим график зависимости  $\kappa(T)$  (Рис. 4).

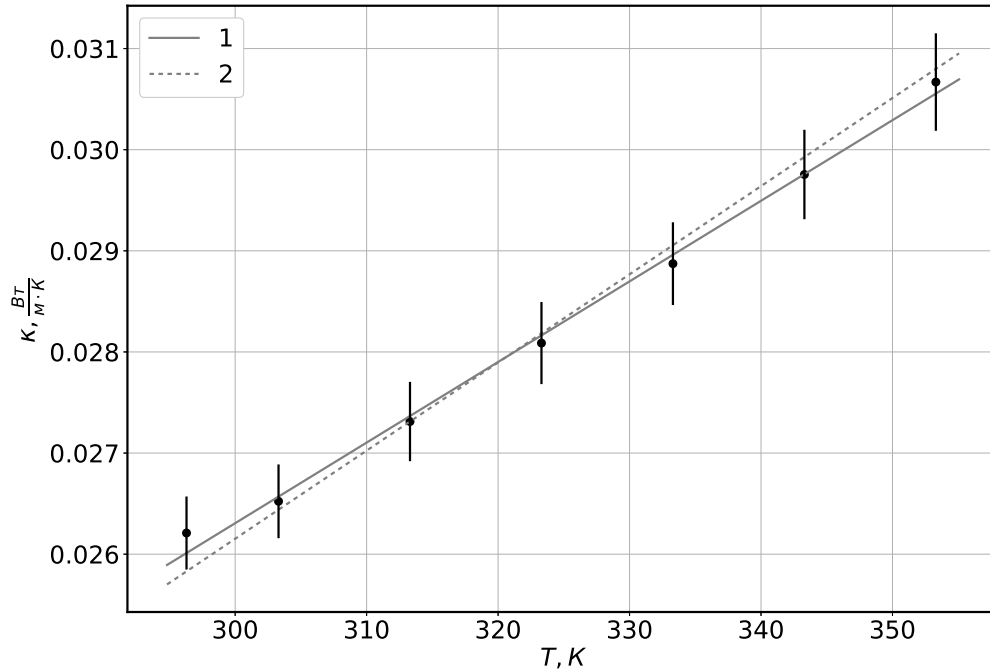


Рис. 4: Зависимость коэффициента теплопроводности воздуха  $\kappa$  от абсолютной температуры  $T$ . Цифрами обозначены кривые, аппроксимирующие зависимость: 1 -  $\kappa = AT^n$ , 2 -  $\kappa = AT$ .

Оказалось, что зависимость коэффициента теплопроводности от температуры близка к линейной, что расходится с теорией твёрдых шариков, где предсказывается зависимость, пропорциональная квадратному корню из температуры. Такое расхождение может объясняться малым диапазоном измерения температур или несовершенством модели.

## 4 Выводы

Найдены значения коэффициентов теплопроводности воздуха в диапазоне  $20 - 80$  °C. Определён экспериментальный вид зависимости коэффициента теплопроводности воздуха от температуры, вблизи указанного диапазона температур  $\kappa = AT$ , где  $A = (8.717 \pm 0.034) \cdot 10^{-5} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}^2}$ .

## 5 Используемая литература

### Список литературы

[1] Лабораторный практикум по общей физике, Том 1, под редакцией А. Д. Гладуна

## 6 Приложение

### 6.1 Параметры установки и погрешности приборов

Внутренний диаметр  $d_1 = (5.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-5}$  м, внешний диаметр  $d_2 = (7.00 \pm 0.10) \cdot 10^{-3}$  м, длина установки  $L = (4.000 \pm 0.020) \cdot 10^{-1}$  м. Погрешности измерения амперметра и вольтметра взяты за последнюю цифру измерения, значение которой стабилизировалось при измерениях:  $\sigma U = 10^{-4}$  В,  $\sigma I = 10^{-5}$  А.

### 6.2 Данные результатов измерений

|   | $U$ , В | $I$ , А | $Q$ , Вт | $R$ , Ом | $\sigma Q$ , Вт $\cdot 10^{-6}$ | $\sigma R$ , Ом |
|---|---------|---------|----------|----------|---------------------------------|-----------------|
| 0 | 0.2658  | 0.01319 | 0.00351  | 20.156   | 3.0                             | 0.017           |
| 1 | 0.5277  | 0.02610 | 0.01377  | 20.217   | 6.0                             | 0.009           |
| 2 | 0.7959  | 0.03917 | 0.03117  | 20.320   | 9.0                             | 0.006           |
| 3 | 1.1636  | 0.05675 | 0.06603  | 20.505   | 13                              | 0.004           |
| 4 | 1.4514  | 0.07010 | 0.10174  | 20.705   | 16                              | 0.003           |
| 5 | 1.7358  | 0.08294 | 0.14397  | 20.928   | 19                              | 0.003           |
| 6 | 2.0635  | 0.09721 | 0.20059  | 21.227   | 23                              | 0.002           |
| 7 | 2.3684  | 0.10994 | 0.26038  | 21.543   | 26                              | 0.002           |

Таблица 1: Результаты измерений сопротивления  $R$  от выделяемого тепла  $Q$  при температуре  $T = 23^\circ\text{C}$ . Прямыми измерениями являются напряжение  $U$  и ток  $I$ ,  $\sigma Q$  и  $\sigma R$  - погрешности косвенных измерений.

|   | $U$ , В | $I$ , А | $Q$ , Вт | $R$ , Ом | $\sigma Q$ , Вт $\cdot 10^{-6}$ | $\sigma R$ , Ом |
|---|---------|---------|----------|----------|---------------------------------|-----------------|
| 0 | 0.2849  | 0.01378 | 0.00393  | 20.675   | 3.0                             | 0.017           |
| 1 | 0.5684  | 0.02743 | 0.01559  | 20.722   | 6.0                             | 0.008           |
| 2 | 0.8556  | 0.04108 | 0.03515  | 20.828   | 9.0                             | 0.006           |
| 3 | 1.1502  | 0.05484 | 0.06308  | 20.974   | 13                              | 0.004           |
| 4 | 1.4509  | 0.06852 | 0.09942  | 21.175   | 16                              | 0.003           |
| 5 | 1.7650  | 0.08244 | 0.14551  | 21.410   | 19                              | 0.003           |
| 6 | 2.0824  | 0.09595 | 0.19981  | 21.703   | 23                              | 0.002           |
| 7 | 2.4158  | 0.10962 | 0.26482  | 22.038   | 27                              | 0.002           |

Таблица 2: Результаты измерений сопротивления  $R$  от выделяемого тепла  $Q$  при температуре  $T = 30^\circ\text{C}$ . Прямыми измерениями являются напряжение  $U$  и ток  $I$ ,  $\sigma Q$  и  $\sigma R$  - погрешности косвенных измерений.

|   | $U$ , В | $I$ , А | $Q$ , Вт | $R$ , Ом | $\sigma Q$ , Вт $\cdot 10^{-6}$ | $\sigma R$ , Ом |
|---|---------|---------|----------|----------|---------------------------------|-----------------|
| 0 | 0.6760  | 0.03150 | 0.02129  | 21.460   | 7.0                             | 0.008           |
| 1 | 0.9648  | 0.04473 | 0.04316  | 21.569   | 11                              | 0.005           |
| 2 | 1.1871  | 0.05474 | 0.06498  | 21.686   | 13                              | 0.004           |
| 3 | 1.3774  | 0.06319 | 0.08704  | 21.798   | 15                              | 0.004           |
| 4 | 1.5488  | 0.07067 | 0.10945  | 21.916   | 17                              | 0.003           |
| 5 | 1.7034  | 0.07732 | 0.13171  | 22.031   | 19                              | 0.003           |
| 6 | 1.8505  | 0.08355 | 0.15461  | 22.148   | 20                              | 0.003           |
| 7 | 1.9870  | 0.08925 | 0.17734  | 22.263   | 22                              | 0.003           |
| 8 | 2.1199  | 0.09472 | 0.2008   | 22.381   | 23                              | 0.003           |
| 9 | 2.2515  | 0.10005 | 0.22526  | 22.504   | 25                              | 0.002           |

Таблица 3: Результаты измерений сопротивления  $R$  от выделяемого тепла  $Q$  при температуре  $T = 40^\circ\text{C}$ . Прямыми измерениями являются напряжение  $U$  и ток  $I$ ,  $\sigma Q$  и  $\sigma R$  - погрешности косвенных измерений.

|   | $U$ , В | $I$ , А | $Q$ , Вт | $R$ , Ом | $\sigma Q$ , Вт $\cdot 10^{-6}$ | $\sigma R$ , Ом |
|---|---------|---------|----------|----------|---------------------------------|-----------------|
| 0 | 0.6981  | 0.03149 | 0.02198  | 22.169   | 8.0                             | 0.008           |
| 1 | 0.9949  | 0.04465 | 0.04442  | 22.282   | 11                              | 0.005           |
| 2 | 1.2258  | 0.05473 | 0.06709  | 22.397   | 13                              | 0.004           |
| 3 | 1.4288  | 0.06344 | 0.09064  | 22.522   | 16                              | 0.004           |
| 4 | 1.6056  | 0.07096 | 0.11393  | 22.627   | 18                              | 0.003           |
| 5 | 1.7726  | 0.07791 | 0.13810  | 22.752   | 19                              | 0.003           |
| 6 | 1.9092  | 0.08353 | 0.15948  | 22.856   | 21                              | 0.003           |
| 7 | 2.0549  | 0.08942 | 0.18375  | 22.98    | 22                              | 0.003           |
| 8 | 2.1616  | 0.09369 | 0.20252  | 23.072   | 24                              | 0.003           |
| 9 | 2.3284  | 0.10026 | 0.23345  | 23.224   | 25                              | 0.003           |

Таблица 4: Результаты измерений сопротивления  $R$  от выделяемого тепла  $Q$  при температуре  $T = 50^\circ\text{C}$ . Прямыми измерениями являются напряжение  $U$  и ток  $I$ ,  $\sigma Q$  и  $\sigma R$  - погрешности косвенных измерений.



|   | $U$ , В | $I$ , А | $Q$ , Вт | $R$ , Ом | $\sigma Q$ , Вт $\cdot 10^{-6}$ | $\sigma R$ , Ом |
|---|---------|---------|----------|----------|---------------------------------|-----------------|
| 0 | 0.7199  | 0.03147 | 0.02266  | 22.876   | 8.0                             | 0.008           |
| 1 | 1.0280  | 0.04470 | 0.04595  | 22.998   | 11                              | 0.006           |
| 2 | 1.2664  | 0.05480 | 0.06940  | 23.109   | 14                              | 0.005           |
| 3 | 1.4694  | 0.06326 | 0.09295  | 23.228   | 16                              | 0.004           |
| 4 | 1.6349  | 0.07008 | 0.11457  | 23.329   | 18                              | 0.004           |
| 5 | 1.8201  | 0.07758 | 0.14120  | 23.461   | 20                              | 0.003           |
| 6 | 1.9728  | 0.08366 | 0.16504  | 23.581   | 21                              | 0.003           |
| 7 | 2.1178  | 0.08939 | 0.18931  | 23.692   | 23                              | 0.003           |
| 8 | 2.2594  | 0.09487 | 0.21435  | 23.816   | 25                              | 0.003           |
| 9 | 2.3919  | 0.09996 | 0.23909  | 23.929   | 26                              | 0.003           |

Таблица 5: Результаты измерений сопротивления  $R$  от выделяемого тепла  $Q$  при температуре  $T = 60^\circ\text{C}$ . Прямыми измерениями являются напряжение  $U$  и ток  $I$ ,  $\sigma Q$  и  $\sigma R$  - погрешности косвенных измерений.

|   | $U$ , В | $I$ , А | $Q$ , Вт | $R$ , Ом | $\sigma Q$ , Вт $\cdot 10^{-6}$ | $\sigma R$ , Ом |
|---|---------|---------|----------|----------|---------------------------------|-----------------|
| 0 | 0.7457  | 0.03161 | 0.02357  | 23.591   | 8.0                             | 0.008           |
| 1 | 1.0598  | 0.04470 | 0.04737  | 23.709   | 12                              | 0.006           |
| 2 | 1.3027  | 0.05468 | 0.07123  | 23.824   | 14                              | 0.005           |
| 3 | 1.5142  | 0.06325 | 0.09577  | 23.940   | 16                              | 0.004           |
| 4 | 1.7019  | 0.07074 | 0.12039  | 24.059   | 18                              | 0.004           |
| 5 | 1.8752  | 0.07758 | 0.14548  | 24.171   | 20                              | 0.003           |
| 6 | 2.0318  | 0.08366 | 0.16998  | 24.286   | 22                              | 0.003           |
| 7 | 2.1524  | 0.08828 | 0.19001  | 24.382   | 23                              | 0.003           |
| 8 | 2.3261  | 0.09483 | 0.22058  | 24.529   | 25                              | 0.003           |
| 9 | 2.4691  | 0.10018 | 0.24735  | 24.647   | 27                              | 0.003           |

Таблица 6: Результаты измерений сопротивления  $R$  от выделяемого тепла  $Q$  при температуре  $T = 70^\circ\text{C}$ . Прямыми измерениями являются напряжение  $U$  и ток  $I$ ,  $\sigma Q$  и  $\sigma R$  - погрешности косвенных измерений.

|   | $U$ , В | $I$ , А | $Q$ , Вт | $R$ , Ом | $\sigma Q$ , Вт $\cdot 10^{-6}$ | $\sigma R$ , Ом |
|---|---------|---------|----------|----------|---------------------------------|-----------------|
| 0 | 0.7697  | 0.03165 | 0.02436  | 24.319   | 8.0                             | 0.008           |
| 1 | 1.0913  | 0.04469 | 0.04877  | 24.419   | 12                              | 0.006           |
| 2 | 1.3441  | 0.05478 | 0.07363  | 24.536   | 15                              | 0.005           |
| 3 | 1.5588  | 0.06324 | 0.09858  | 24.649   | 17                              | 0.004           |
| 4 | 1.7518  | 0.07072 | 0.12389  | 24.771   | 19                              | 0.004           |
| 5 | 1.9298  | 0.07755 | 0.14966  | 24.885   | 21                              | 0.003           |
| 6 | 2.0909  | 0.08363 | 0.17486  | 25.002   | 23                              | 0.003           |
| 7 | 2.2438  | 0.08932 | 0.20042  | 25.121   | 24                              | 0.003           |
| 8 | 2.3926  | 0.09481 | 0.22684  | 25.236   | 26                              | 0.003           |
| 9 | 2.5402  | 0.10017 | 0.25445  | 25.359   | 27                              | 0.003           |

Таблица 7: Результаты измерений сопротивления  $R$  от выделяемого тепла  $Q$  при температуре  $T = 80^\circ\text{C}$ . Прямыми измерениями являются напряжение  $U$  и ток  $I$ ,  $\sigma Q$  и  $\sigma R$  - погрешности косвенных измерений.

|   | $T$ , $^\circ\text{C}$ | $R_0$ , Ом | $\beta$ , $\frac{\text{Ом}}{\text{Вт}}$ | $\sigma R_0$ , Ом | $\sigma \beta$ , $\frac{\text{Ом}}{\text{Вт}}$ |
|---|------------------------|------------|---|-------------------|--|
| 0 | 23.0                   | 20.157     | 5.33                                    | 0.003             | 0.01   |
| 1 | 30.0                   | 20.646     | 5.27                                    | 0.003             | 0.01   |
| 2 | 40.0                   | 21.355     | 5.11                                    | 0.004             | 0.02   |
| 3 | 50.0                   | 22.064     | 4.97                                    | 0.004             | 0.03   |
| 4 | 60.0                   | 22.777     | 4.84                                    | 0.004             | 0.02   |
| 5 | 70.0                   | 23.489     | 4.69                                    | 0.005             | 0.03   |
| 6 | 80.0                   | 24.203     | 4.55                                    | 0.007             | 0.04   |

Таблица 8: Значения сопротивлений нагрузок  $R_0$  при температурах  $T$  и коэффициентов  $\beta = \frac{dR}{dQ}$ .

|   | $T$ , $^\circ\text{C}$ | $\kappa$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ | $\sigma \kappa$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ | $\ln T$ | $\sigma \ln T$ | $\ln \kappa$ | $\sigma \ln \kappa$ |
|---|------------------------|--|---|---------|----------------|--------------|---------------------|
| 0 | 23.0                   | 0.0262   | 0.0004  | 5.6914  | 0.0003         | -3.64        | 0.01                |
| 1 | 30.0                   | 0.0265   | 0.0004  | 5.7147  | 0.0003         | -3.63        | 0.01                |
| 2 | 40.0                   | 0.0273   | 0.0004  | 5.7472  | 0.0003         | -3.60        | 0.01                |
| 3 | 50.0                   | 0.0281   | 0.0004  | 5.7786  | 0.0003         | -3.57        | 0.01                |
| 4 | 60.0                   | 0.0289   | 0.0004  | 5.8090  | 0.0003         | -3.54        | 0.01                |
| 5 | 70.0                   | 0.0298   | 0.0004  | 5.8386  | 0.0003         | -3.51        | 0.01                |
| 6 | 80.0                   | 0.0307   | 0.0005  | 5.8673  | 0.0003         | -3.48        | 0.02                |

Таблица 9: Значения коэффициентов теплопроводности  $\kappa$  в зависимости от температуры  $T$ .