

Измерение теплопроводности воздуха при разных давлениях (2.2.2)

Павлушкин Вячеслав

10 июня 2022 г.

1 Аннотация

В данной работе мы наблюдаем за изменением теплопроводности воздуха с помощью платиновой нити. Определяем коэффициент теплопередачи при высоких и низких давлениях

2 Теоретические сведения

Теплопроводность — это процесс передачи энергии от нагретых частей системы к холодным за счет хаотического движения частиц среды (молекул, атомов и т.п.). В газах теплопроводность осуществляется за счет непосредственной передачи кинетической энергии от быстрых молекул к медленным при их столкновениях. Перенос тепла описывается законом Фурье:

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

где \vec{q} — плотность потока энергии, κ — коэффициент теплопроводности. Система, используемая в данной установке, имеет цилиндрическую симметрию (пренебрегая краевыми эффектами), поэтому имеем

$$q = -\kappa \frac{dT}{dr},$$

где r — расстояние от оси симметрии системы.

Закон Фурье применим при условиях

$$\lambda \ll r \quad \text{и} \quad \lambda |\nabla T| \ll T,$$

где λ — длина свободного пробега молекул газа, а r — характерный размер системы.

Для количественного описания способности некоторой системы к теплопередаче в целом используют коэффициент K , называемый *тепловым сопротивлением*, равный отношению перепада температур ΔT в системе к полному потоку энергии Q [Вт] через нее:

$$K = \frac{\Delta T}{Q}$$

3 Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. (1) Внутренняя полость тонкостенной цилиндрической стеклянной колбы, на оси которой натянута металлическая (платиновая) нить, подсоединена к вакуумной установке. Колба заполнена воздухом и расположена вертикально. Контактные провода от нити выведены наружу через стеклянную вакуумную «слезку».

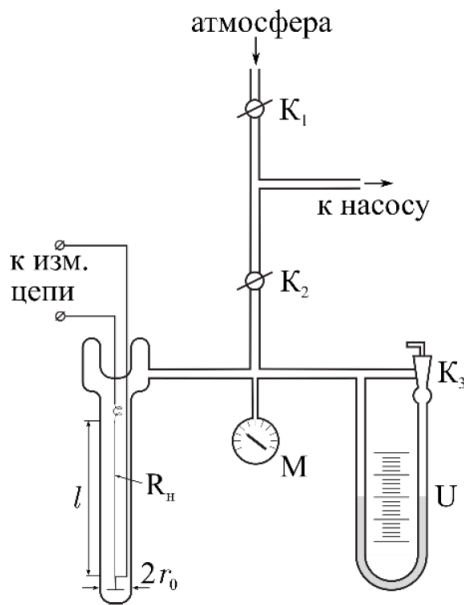


Рис. 1: Вакуумная часть установки

Вакуумная установка состоит из форвакуумного насоса, стрелочного вакуумметра M и U-образного масляного манометра. Вакуумметр служит для измерения высоких давлений вплоть до 10 торр (он показывает разность давлений между установкой и атмосферой, так что нуль на его шкале соответствует атмосферному давлению в установке). U-образный манометр заполнен маслом с плотностью $0,885 \text{ г/см}^3$ и предназначен для измерения низких давлений (вплоть до $0,1$ торр). Кран K_1 служит для соединения установки и насоса с атмосферой, кран K_2 — для отсоединения откачиваемого объема от насоса, кран K_3 — для соединения колен U-образного манометра.

Металлическая нить служит как источником тепла, так и датчиком температуры (термометром сопротивления). В рабочем диапазоне температур ($20\text{--}40^\circ\text{C}$) сопротивление платины зависит от температуры практически линейно:

$$R(t) = R_0 (1 + \alpha_0 t)$$

где t — температура в $^\circ\text{C}$, R_0 — сопротивление при 0°C , и

$$\alpha_0 = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dt} = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

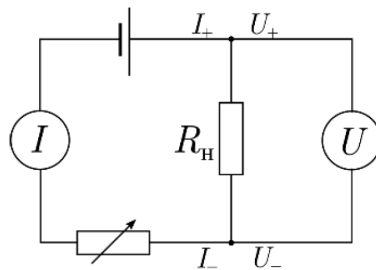


Рис. 2: Электрическая схема измерений

Электрическая схема установки приведена на рис. (2) Ток I через сопротивление R_n и напряжение U на нем измеряются цифровыми мультиметрами, один из которых работает в режиме амперметра, а другой — вольтметра. Сопротивление R_n находится по закону Ома. Те же измерения позволяют определить мощность нагрева проволоки как джоулево тепло. Ток в цепи регулируется с помощью магазина сопротивлений, включенного последовательно с источником тока.

4 Ход работы

1. Оценим, когда длина свободного пробега сравняется с радиусом нити:

$$P_1 \approx \frac{kT}{r\pi d^2} \approx 430 \text{ Па.}$$

2. Проведя подготовку экспериментальной установки измерим зависимость сопротивления нити от подаваемой на нее мощности:

| I , мА | U , В | R , Ом | Q , 10^{-6} Вт |
|----------|---------|----------|--------------------|
| 10.03 | 0.118 | 11.76 | 1.18 |
| 20.16 | 0.237 | 11.76 | 4.78 |
| 30.06 | 0.354 | 11.78 | 10.64 |
| 40.07 | 0.474 | 11.83 | 18.99 |
| 50.04 | 0.596 | 11.91 | 29.82 |
| 60.06 | 0.72 | 11.99 | 43.24 |
| 70.0 | 0.846 | 12.09 | 59.22 |

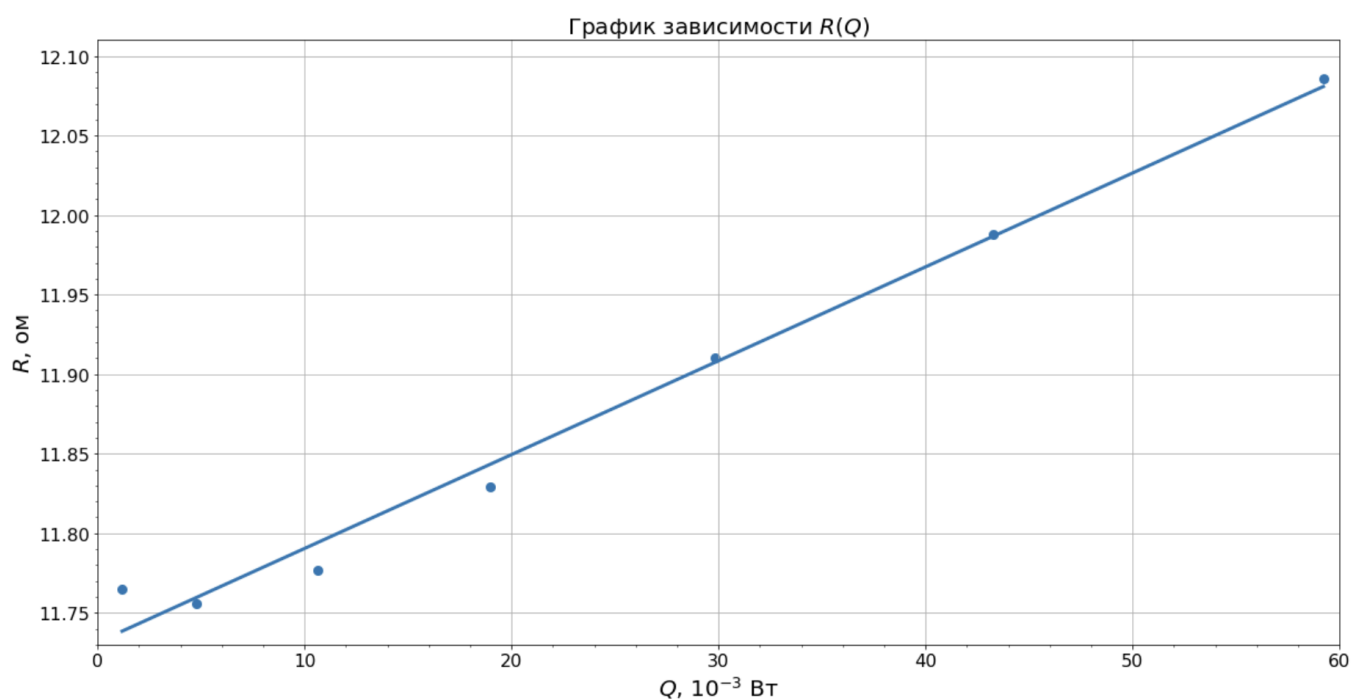


Рис. 3: График зависимости $R(Q)$

3. Экстраполируя график (3) к нулевому значению, получаем:

$$R = (11,73 \pm 0,009) \text{ Ом}, \quad R_0 = (10,63 \pm 0,008) \text{ Ом}, \quad R_{max} = (12,98 \pm 0,010) \text{ Ом}.$$

4. Проводим измерения, аналогичные пункту 2, только теперь еще определяем температуру:

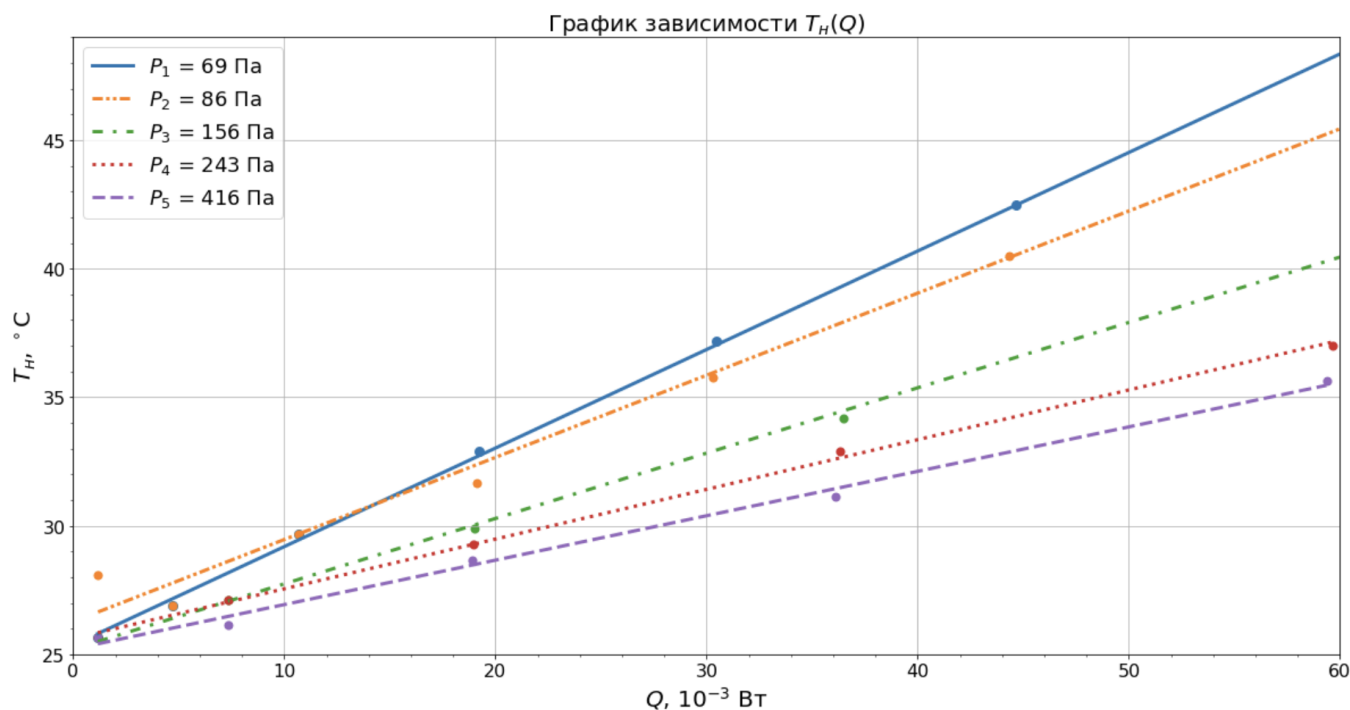
| $P_1 = 69 \text{ Па}$ | | | |
|-----------------------|---------|----------|--------------------|
| I , мА | U , В | T , °С | Q , 10^{-6} Вт |
| 10 | 0.117 | 25.68 | 1.17 |
| 20 | 0.235 | 26.88 | 4.7 |
| 30 | 0.356 | 29.68 | 10.68 |
| 40 | 0.48 | 32.88 | 19.2 |
| 50 | 0.609 | 37.2 | 30.45 |
| 60 | 0.744 | 42.48 | 44.64 |
| 70 | 0.887 | 48.99 | 62.09 |

| $P_2 = 86 \text{ Па}$ | | | |
|-----------------------|---------|----------|--------------------|
| I , мА | U , В | T , °С | Q , 10^{-6} Вт |
| 10 | 0.118 | 28.08 | 1.18 |
| 20 | 0.235 | 26.88 | 4.7 |
| 30 | 0.356 | 29.68 | 10.68 |
| 40 | 0.478 | 31.68 | 19.12 |
| 50 | 0.606 | 35.76 | 30.3 |
| 60 | 0.739 | 40.48 | 44.34 |
| 70 | 0.879 | 46.25 | 61.53 |

Таблица 1: Результаты измерений для низких давлений

Остальные таблицы для низких давлений можно найти в приложении.

График зависимости $T(Q)$, для низких давлений:



Полученные для этих давлений коэффициенты теплового сопротивления:

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| P , Па | 69 | 86 | 156 | 243 | 416 |
| K , $10^3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ | 383.1 | 319.4 | 254.1 | 193.3 | 172.7 |
| σ_K , $10^3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 |

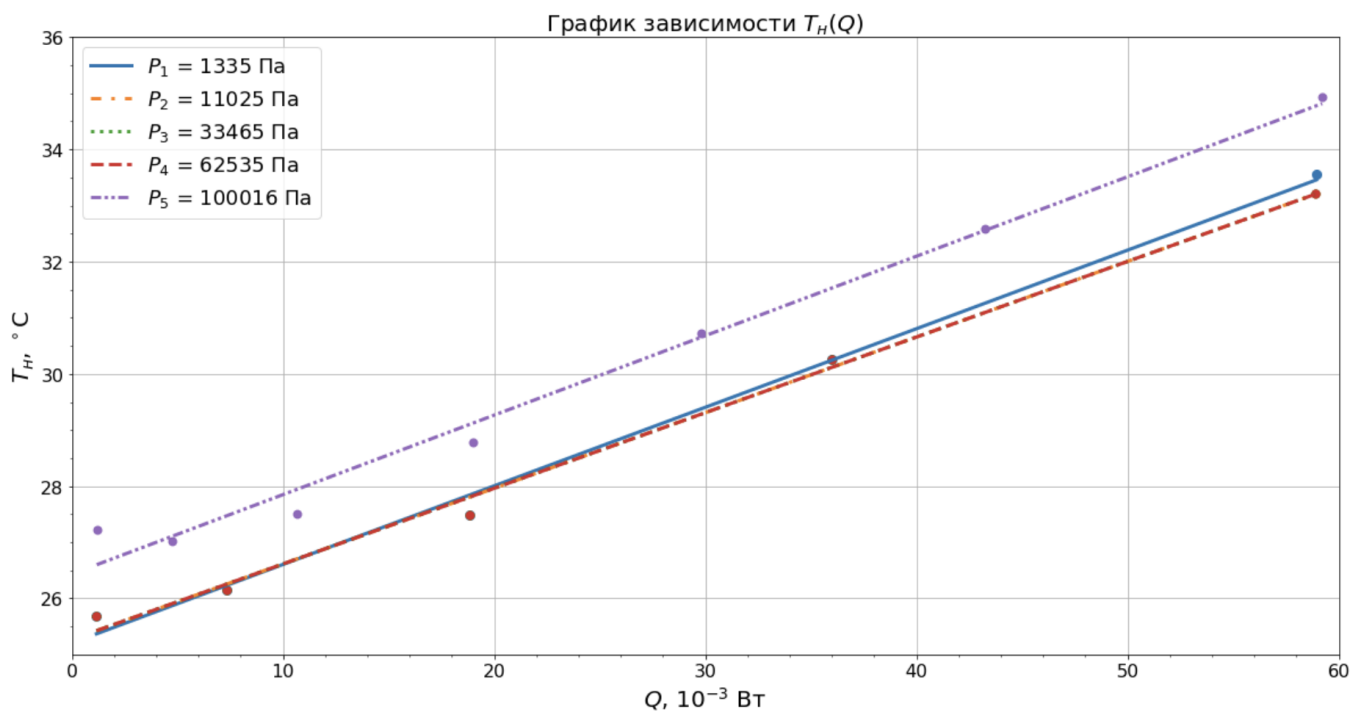
Таблица 2: Коэффициенты теплового сопротивления для низких давлений

То же самое для высоких давлений:

| $P_1 = 1335$ Па | | | |
|-----------------|---------|------------------------|--------------------|
| I , мА | U , В | T , $^\circ\text{C}$ | Q , 10^{-6} Вт |
| 10 | 0.117 | 25.68 | 1.17 |
| 25 | 0.293 | 26.16 | 7.32 |
| 40 | 0.471 | 27.48 | 18.84 |
| 55 | 0.654 | 30.26 | 35.97 |
| 70 | 0.842 | 33.56 | 58.94 |

| $P_2 = 11025$ Па | | | |
|------------------|---------|------------------------|--------------------|
| I , мА | U , В | T , $^\circ\text{C}$ | Q , 10^{-6} Вт |
| 10 | 0.117 | 25.68 | 1.17 |
| 25 | 0.293 | 26.16 | 7.32 |
| 40 | 0.471 | 27.48 | 18.84 |
| 55 | 0.654 | 30.26 | 35.97 |
| 70 | 0.841 | 33.22 | 58.87 |

Таблица 3: Результаты измерений для высоких давлений

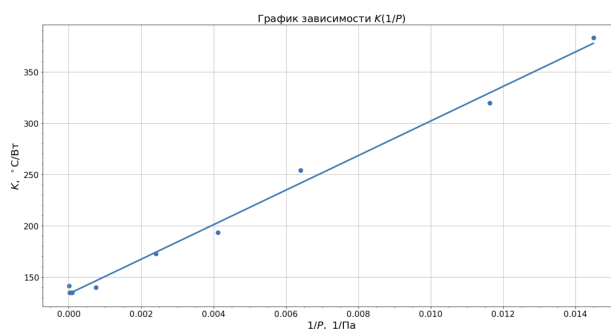
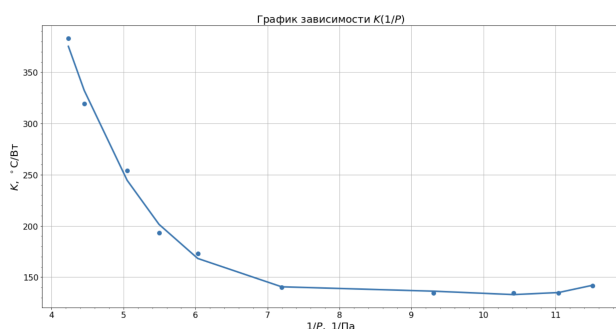


Коэффициенты теплового сопротивления полученные для высоких давлений :

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--|-------|-------|-------|-------|--------|
| $P, \text{ Па}$ | 1335 | 11025 | 33465 | 62535 | 100016 |
| $K, \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ | 140.0 | 134.7 | 134.7 | 134.7 | 141.6 |
| $\sigma_K, \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$ | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 |

Таблица 4: Коэффициенты теплового сопротивления для высоких давлений

5. По полученным данным построим график зависимости теплового сопротивления системы от давления $K(P)$:



И, действительно, заметна область, где теплопередача перестает зависеть от давления ($K = \text{const}$).

По графику можно найти $K_\infty = (134 \pm 1) \text{ К/Вт}$, и по графику зависимости $K(1/P)$, можно найти $A = (16800 \pm 600) \text{ К/Вт} \cdot \text{Па}$. Теперь, с помощью полученного K_∞ , найдем коэффициент теплопроводности воздуха:

$$\kappa \approx \frac{1}{2\pi L K_\infty} \ln \frac{R}{r_H} = (28.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

6. Так же, с помощью A , можно получить коэффициент аккомодации:

$$s = \frac{1}{Lr_{\text{н}}C_V \cdot A} \sqrt{\frac{\mu RT_{\text{к}}}{2\pi}} \approx 0,65 \pm 0,06$$

5 Вывод

В работе был проверен метод по определению коэффициента теплопроводности воздуха при комнатной температуре в зависимости от давления.

Был получен коэффициент теплопроводности:

$$\kappa = (28.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}.$$

Тепловое сопротивление:

$$K_{\infty} = (134 \pm 1) \text{ К/Вт}$$

И коэффициент аккомодации:

$$s = 0,65 \pm 0,06$$

Также проверена теория о том, что при высоком давлении теплопередача перестает от него зависеть.