

Московский Физико-технический Институт  
(Национальный исследовательский университет)

## Отчет о выполнении работы 2.2.3

Измерение теплопроводности воздуха при атмосферном  
давлении

Выполнили студентки 1 курса  
ФБМФ, группа Б06-103  
Попеску Полина  
Фитэль Алёна

Долгопрудный, 2022 г.

# 1 Введение

**Цель работы:** измерить коэффициент теплопроводности воздуха при атмосферном давлении в зависимости от температуры.

**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).

## 2 Теоретический материал

Основной характеристикой теплопроводности служит коэффициент  $\kappa$ , являющийся коэффициентом пропорциональности между плотностью потока тепла  $q$  и градиентом температуры  $dT/dr$  в направлении распространения этого потока

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

В цилиндрически симметричной установке, в которой тепловой поток направлен к стенкам цилиндра от нити, полный поток тепла  $Q = qS$  через каждую цилиндрическую поверхность радиуса  $r$  должен в стационарном состоянии быть неизменен (как в пространстве, так и во времени). Тогда

$$Q = -2\pi r L \kappa \frac{dT}{dr} = const, \quad (2)$$

Если перепад температуры  $\Delta T = T_2 - T_1$  между нитью и стенками цилиндра мал ( $\Delta T \ll T_1$ ) в (2) можно пренебречь изменением теплопроводности от температуры в пределах системы, положив  $\kappa \approx \kappa(T_1)$ . Тогда разделяя переменные в (2) и интегрируя от радиуса нити до радиуса колбы, получим

$$Q = \frac{2\pi L}{\ln(\frac{r_1}{r_2})} \kappa \cdot \Delta T \quad (3)$$

откуда получаем формулы:

$$T_1 - T_2 = \frac{Q}{2\pi L \kappa} \ln \frac{r_2}{r_1}. \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{Q \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L \cdot \Delta T}. \quad (5)$$

Здесь  $r_1$  и  $T_1$  – радиус и температура нити,  $r_2$  и  $T_2$  – радиус и температура цилиндра.

## 3 Экспериментальная установка

Схема лабораторной установке представлена на рисунке 1. Тонкая молибденовая проволока натянута по оси вертикально стоящей медной трубки. Через штуцер трубка заполняется исследуемым газом. Нить нагревается электрическим током, ее температура  $T_1$  определяется по изменению электрического сопротивления. Трубка находится в кожухе, через который пропускается вода из термостата. Температура воды  $T_2$  измеряется термометром, помещенным в термостат. Количество теплоты, протекающей через газ, равно (если пренебречь утечками тепла через торцы) количеству теплоты, выделяемому током в нити, и может быть найдено по закону Джоуля—Ленца. При этом ток в нити определяется по напряжению на включенном последовательно с ней эталонном сопротивлении 10 Ом. Таким образом, все величины, входящие в правую часть формулы (1), поддаются непосредственному измерению.

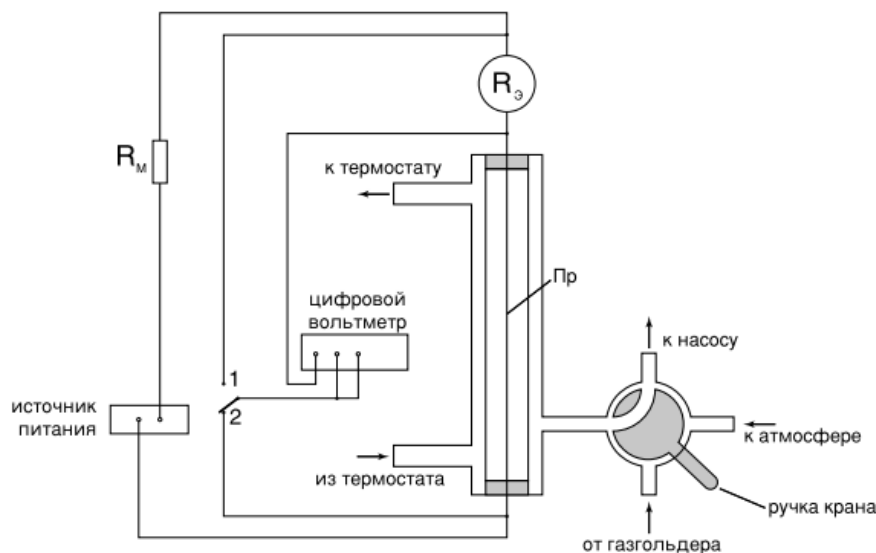


Рис. 1: Схема установки для определения теплопроводности газов

Электрическая часть схемы состоит из источника питания и подключенных к нему последовательно соединенных нити, эталонного сопротивления 10 Ом и магазина сопротивлений  $R_M$ , служащего для точной установки тока через нить. Цифровой вольтметр может подключаться как к нити, так и к эталонному сопротивлению, измеряя таким образом напряжение на нити и ток через нее.

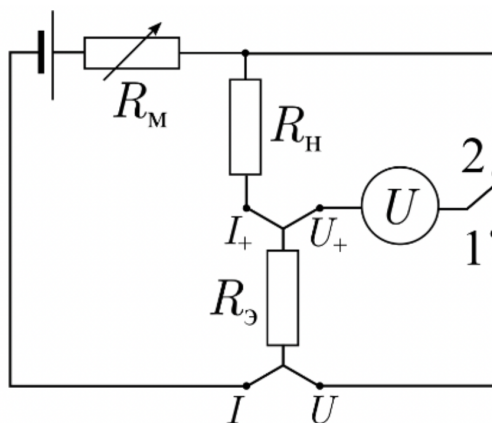


Рис. 2: Электрическая часть схемы установки

Сопротивление нити может быть измерено по формуле:

$$R_H = R_0 \frac{U_H}{U_0} \quad (6)$$

Выделяемая мощность рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{U_H U_0}{R_0} \quad (7)$$

Параметры установки:  $L = 347$  мм;  $2r_1 = 0,050 \pm 0,005$  мм,  $2r_2 = 10,0 \pm 0,1$  мм  $\ln(r_2/r_1) = 5,30$ ,  $R_0 = 10,000 \pm 0,001$  Ом,  $R_H = 17,5$  Ом.

## 4 Обработка результатов измерений

1. Проведем предварительные расчеты параметров опыта. Приняв максимальный перегрев нити относительно термостата равным  $\Delta T_{max} = 10^\circ\text{C}$ , оценим максимальную мощность нагрева  $Q_{max}$ , которую следует подавать на нить, а с ее помощью найдем максимальный ток и напряжение, которые можно подавать системе. Для этого используем уравнение (4), и закон Ома, из которого:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{Q_{max}}{R}} \quad U_{max} = \sqrt{Q_{max}R}$$

Для этой оценки используем значение коэффициента теплопроводности воздуха  $k \approx 25 \frac{\text{мВт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$  и приближенное значение сопротивления нити  $R_n$ , указанное на установке, из которых получим:

$$Q_{max} = 0,10\text{Вт} \quad I_{max} = 0,07\text{А} \quad U_{max} = 1,3\text{В}$$

2. При температурах от 22 до  $70^\circ\text{C}$  измерим зависимость сопротивления нити  $R_n$  от подаваемой на нее мощности  $Q$ , не превышающей  $Q_{max}$ . Сопротивление нити рассчитывается по формуле (6). Выделяемая мощность рассчитывается по формуле (7). Для каждой температуры термостата построим график зависимости сопротивления нити от мощности  $R(Q)$ . Из них получим:

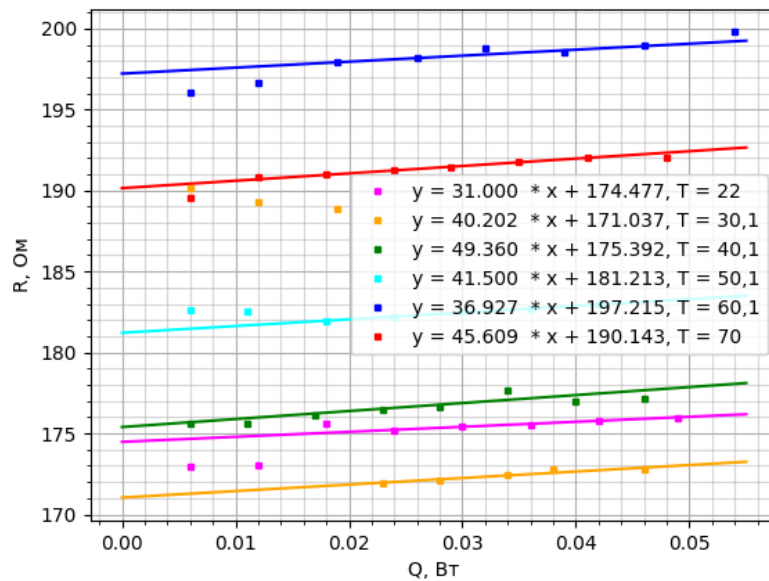


Рис. 3: Зависимость  $R(Q)$

3. Используя полученные из графиков методом экстраполяции значения  $R_0$ , построим график зависимости сопротивления нити от температуры  $R(T)$ . Из него получим значение углового коэффициента наклона прямой  $\frac{dR}{dT} = 0,48 \pm 0,12 \frac{\text{Ом}}{^\circ\text{C}}$  и значение  $R_{273} = 160 \pm 2 \text{ Ом}$  ( $R_{273}$  - сопротивление нити при  $273\text{K}$ ). С помощью этих данных определим температурный коэффициент сопротивления материала нити:  $\alpha = \frac{1}{R_{273}} \cdot \frac{dR}{dT}$ , получим  $\alpha = (3,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

Температура термостата, °C	$\frac{dR}{dQ} \frac{\text{Ом}}{\text{Вт}}$	$R_0, \text{Ом}$
22,0	$31 \pm 3$	$174,48 \pm 0,02$
30,1	$40 \pm 6$	$171,04 \pm 0,05$
40,1	$50 \pm 16$	$175,39 \pm 0,14$
50,1	$41 \pm 2$	$181,21 \pm 0,02$
60,1	$37 \pm 2$	$197,21 \pm 0,03$
70,0	$45 \pm 1$	$190,14 \pm 0,01$

Таблица 1: Данные, полученные из графика на рис. 3

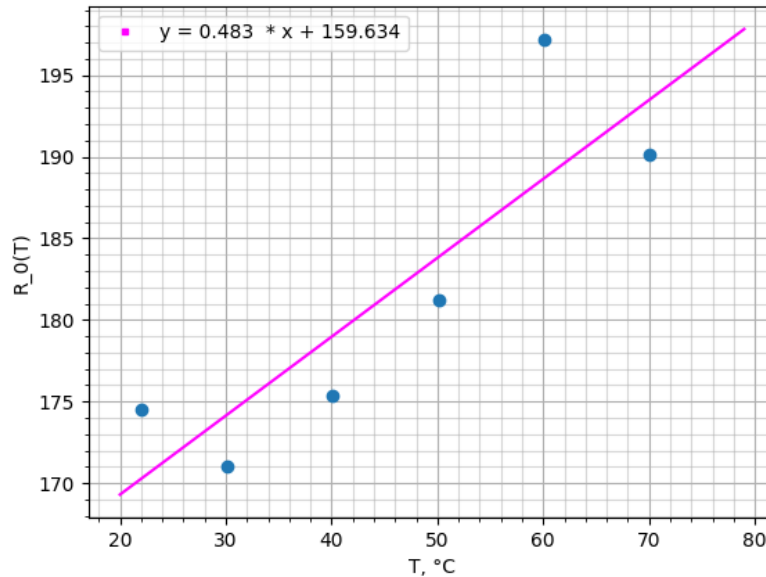


Рис. 4: Зависимость  $R_0(T)$

- Используя угловой коэффициент температурной зависимости сопротивления  $\frac{dR}{dT}$  из п.3 и угловые коэффициенты нагрузочных прямых  $\frac{dR}{dQ}$  из п.2, найдем коэффициенты теплопроводности газа  $k$  для каждой температуры термостата  $T_1$ , используя формулу (5), в которой зависимость выделяющейся на нити мощности от ее перегрева относительно стенок рассчитаем с помощью полученных ранее значений:  $\frac{dQ}{dT} = \frac{dR}{dT} / \frac{dR}{dQ}$ . Для полученных значений построим график зависимости  $k(T)$ :
- Предполагая, что  $k$  степенным образом зависит от температуры:  $k \sim T^\beta$ , построим график в двойном логарифмическом масштабе и определим из него показатель степени  $\beta$ , равный коэффициенту наклона прямой. Погрешности значений  $k$  сильно отличаются друг от друга, поэтому для нахождения коэффициентов прямой воспользуемся методом взвешенного МНК.

Так, получим  $\beta = 0,40 \pm 0,05$ .

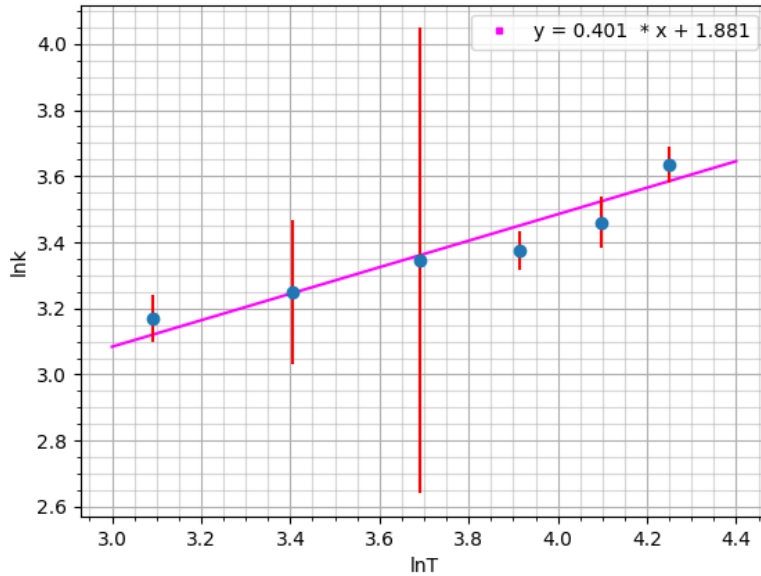


Рис. 5: Зависимость  $\ln k(\ln T)$

## 5 Вывод

1. В ходе проведенной работы были определены коэффициенты теплопроводности воздуха при атмосферном давлении в зависимости от температуры по теплоотдаче нагреваемой током нити в цилиндрическом сосуде. Для этого были измерены зависимости значений сопротивления нити от подаваемой на нее мощности, которые в условиях данного опыта должны быть линейными, в силу выбранного рабочего диапазона температур. Из-за существенного вклада термоэлектрических явлений в проводниках и контактах точность измерений при малых токах невелика. Чем меньший ток мы пропускаем, тем с меньшей точностью у нас измеряется сам ток и напряжение. Вследствие этого первые три точки существенно отклоняются от остальных (см. прямые 2, 4, 5, 6). На прямой 2 при учете первых трех точек получается отрицательный наклон прямой, а следовательно, отрицательная теплопроводность, что говорит о явной ошибке в измерениях. Поэтому при подсчете коэффициентов прямых мы не учитывали первые три точки.

Кроме того, неточность измерений напряжений связана с эффектом Зеебека. Нить соединена с проводом, эти проводники имеют различные температуры, а значит, соответственно данному явлению, возникает ЭДС на их концах.

2. Далее методом экстраполяции были определены значения  $R$  при стремлении мощности нагревателя к нулю, при котором температура стенок и нити должны совпадать. Из этого была получена зависимость  $R$  от  $T$ , угловой коэффициент наклона которой равен температурному коэффициенту сопротивления материала нити альфа  $\alpha = (3,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-3}$ . Теоретическое значение для молибдена  $4,579 \cdot 10^{-3}$ . Заметим, что полученный результат сходится с ожидаемым лишь в пределах  $2\sigma$ . Это объясняется тем, что на самом деле зависимость  $R(T)$  не линейна, а также полученные методом экстраполяции значения  $R_0$  недостаточно точны (см п.1).

3. По полученной зависимости  $k(T)$ , построенной в двойных логарифмических координатах, был определен показатель степени  $\beta$  зависимости  $k(T)$ :  $\kappa = AT^\beta$ , полученное значение:  $\beta = 0,40 \pm 0,05$ , теоретически ожидаемое значение - 0,5. В пределах погрешности, полученный результат не сходится с ожидаемым. Это связано с тем, что полученные нами значения теплопроводности воздуха не вполне соответствуют действительности (см. п.1).