

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

**Определение теплопроводности
воздуха при атмосферном
давлении**

выполнила студентка 653 группы ФФКЭ

Карпова Татьяна

Долгопрудный, 2017 г.

1 Цель работы

Определение коэффициента теплопроводности воздуха при атмосферном давлении и разных температурах по теплоотдаче нагреваемой током нити в цилиндрическом сосуде

2 В работе используются

- прибор для определения теплопроводности газов
- форвакуумный насос
- термостат
- магазин сопротивлений
- цифровой вольтметр В7-38
- эталонное сопротивление 10 Ом
- источник питания

3 Теоретические положения

Теплопроводность — процесс, приводящий к выравниванию температуры в сосуде, где температура заключённого газа зависит от координат. Теплопроводность связана с тепловым движением молекул и не сопровождается макроскопическими перемещениями газа.

Коэффициент теплопроводности — основная характеристика теплопроводности — это коэффициент пропорциональности между плотностью потока тепла q и градиентом температуры dT/dr в направлении этого потока:

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

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 в пространстве и во времени. Тогда

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

откуда получаем

$$T_1 - T_2 = \frac{Q}{2\pi L \kappa} \ln \frac{R}{r}$$

В нашем эксперименте необходимо найти

$$\kappa = \frac{Q}{T_1 - T_2} \frac{1}{2\pi L} \ln \frac{r^2}{r_1} \quad (1)$$

4 Экспериментальная установка

Схема лабораторной установки 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.

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.

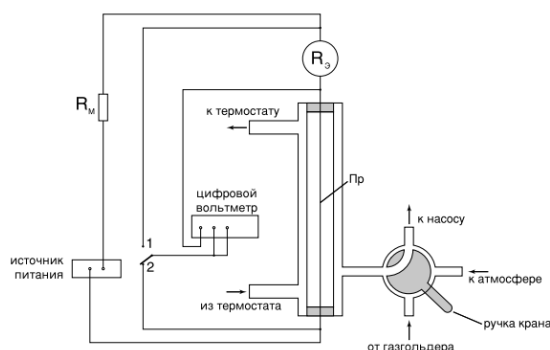


Рис. 1: Схема установки для определения теплопроводности газов

5 Ход работы

1. Определим параметры экспериментальной установки:

$$\begin{aligned} L &= 347 \text{ мм} \\ 2r_1 &= 0,055 \text{ мм} \\ 2r_2 &= 10 \text{ мм} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_0 &= 10 \text{ Ом} \\ \text{класс точности} &0,01 \end{aligned}$$

Таблица 1: Значения напряжения на установке, сопротивления нити и выделяемой на ней мощности от температуры нити

T = 24,1 C				T = 30,5 C				T = 40,3 C			
U0, В	Un, В	Rn, Ом	Q, Вт	U0, В	Un, В	Rn, Ом	Q, Вт	U0, В	Un, В	Rn, Ом	Q, Вт
0,1	0,116	11,6	0,0012	0,1	0,119	11,9	0,0012	0,1	0,123	12,3	0,0012
0,2	0,232	11,6	0,0046	0,2	0,238	11,9	0,0048	0,2	0,246	12,3	0,0049
0,5	0,586	11,7	0,0293	0,5	0,600	12,0	0,0300	0,5	0,629	12,6	0,0315
0,75	0,891	11,9	0,0669	0,75	0,912	12,2	0,0684	0,75	0,942	12,6	0,0706
1	1,213	12,1	0,1213	1	1,241	12,4	0,1241	1	1,280	12,8	0,1280
1,25	1,559	12,5	0,1949	1,25	1,595	12,8	0,1993	1,25	1,643	13,1	0,2054
1,5	1,941	12,9	0,2911	1,5	1,984	13,2	0,2976	1,5	2,043	13,6	0,3064

T = 49,8 C				T = 59,9 C			
U0, В	Un, В	Rn, Ом	Q, Вт	U0, В	Un, В	Rn, Ом	Q, Вт
0,1	0,127	12,73	0,0013	0,1	0,131	13,1	0,0013
0,2	0,255	12,77	0,0051	0,2	0,263	13,2	0,0053
0,5	0,643	12,86	0,0322	0,5	0,664	13,3	0,0332
0,75	0,978	13,04	0,0734	0,75	1,010	13,5	0,0757
1	1,331	13,31	0,1331	1	1,372	13,7	0,1372
1,25	1,708	13,67	0,2135	1,25	1,754	14,0	0,2193
1,5	2,127	14,18	0,3191	1,5	2,188	14,6	0,3282

2. Проведём измерения зависимости падения напряжений от температуры молибденовой нити. Для этого будем устанавливать с помощью магазина напряжений различные напряжения в цепи в интервале от 0,1 до 1,5 В и затем переносить штекер от вольтметра на прибор для измерения теплопроводности. Зависимость снимем для различных температур в интервале от 25 до 60 градусов. Результаты измерений занесём в таблицу 1.

Сопротивление нити рассчитывается по формуле $R_H = R_0 \frac{U_H}{U_0}$. Выделяемая мощность рассчитывается по формуле $Q = \frac{U_H U_0}{R_0}$. Эти значения также занесём в таблицу 1.

3. Для каждой серии измерений построим график зависимости выделяемой мощности от сопротивления нити. По графику определим наклон dQ/dR и сопротивление нити при температуре термостата (при $Q = 0$).

$$\begin{aligned}
 T = 24,1 \text{ C:} & \quad dQ/dR = 0.2153, R_0 = 11.57 \text{ Ом} \\
 T = 30,5 \text{ C:} & \quad dQ/dR = 0.22, R_0 = 11.87 \text{ Ом} \\
 T = 40,3 \text{ C:} & \quad dQ/dR = 0.2314, R_0 = 12.29 \text{ Ом} \\
 T = 49,8 \text{ C:} & \quad dQ/dR = 0.2218, R_0 = 12.72 \text{ Ом} \\
 T = 59,9 \text{ C:} & \quad dQ/dR = 0.2296, R_0 = 13.13 \text{ Ом}
 \end{aligned}$$

4. Проанализируем график. Мы видим, что с повышением температуры угол наклона прямой $Q(R)$ увеличивается, но на температуре 49,8

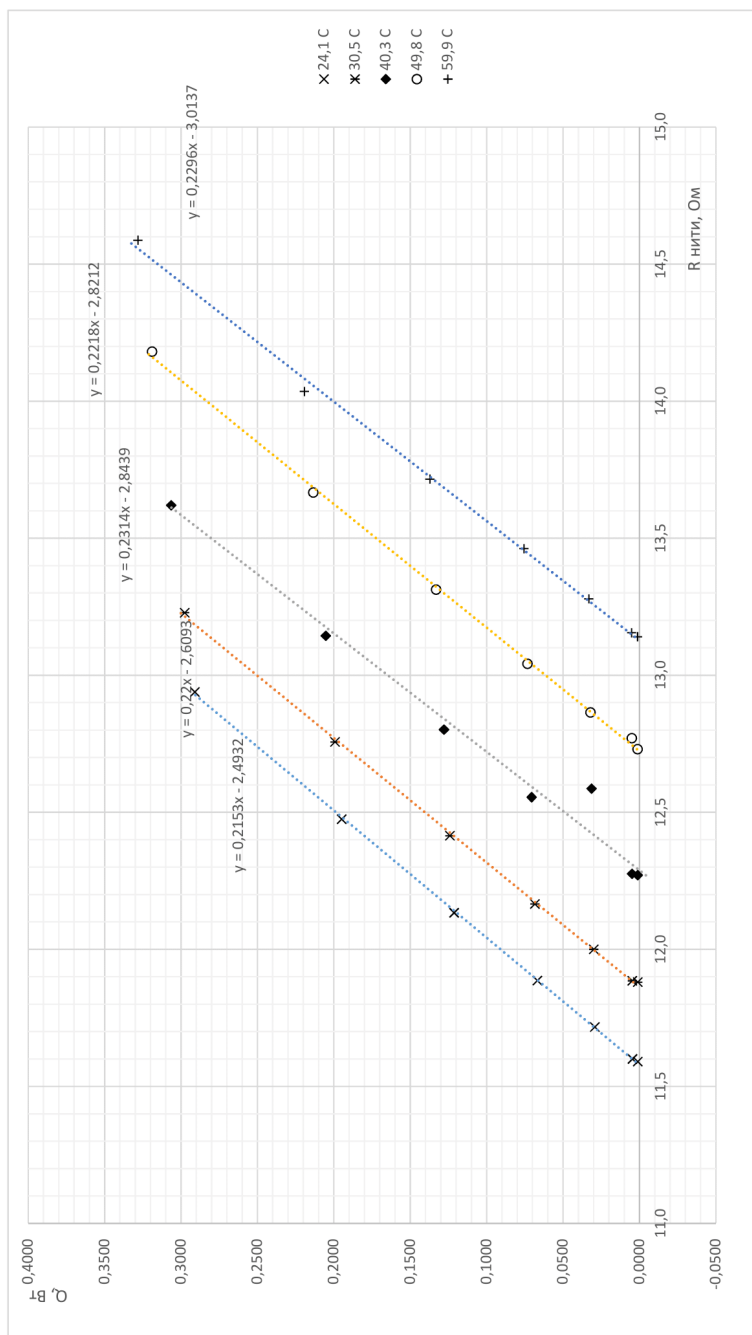


Рис. 2: Зависимость выделяемой мощности от сопротивления нити

С зависимость нарушается: коэффициент угла наклона уменьшается. Это явление можно объяснить проявлением конвекции при достижении воздухом в установке достаточно высокой температуры: часть тепловой энергии переносится от нити к стенке именно этим путём. Поэтому нет ничего удивительного, что результаты при высоких температурах отличаются от ожидаемых, график должен "опутиться".

5. Оценим погрешность измерений. Погрешность измерений выделяемой мощности оценим по формуле

$$\sigma Q = Q \sqrt{\left(\frac{\sigma U_H}{U_H}\right)^2 + \left(\frac{\sigma U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma R_0}{R_0}\right)^2}$$

Погрешность измерений сопротивления нити оценим по формуле

$$\sigma R = R \sqrt{\left(\frac{\sigma U_H}{U_H}\right)^2 + \left(\frac{\sigma U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma R_0}{R_0}\right)^2}$$

Также оценим влияние потерь тепла через концы проволоки. Рассчитаем количество тепла, отводимое с двух концов молибденовой проволоки длиной 1 см каждый, зная разность комнатной температуры и температуры воздуха в установке.

Формула для мощности тепловых потерь в результате теплопроводности:

$$Q = -\kappa \frac{S \Delta T}{L},$$

где κ - теплопроводность металла, $S = \pi r^2$ - площадь поперечного сечения образца, L - его длина, ΔT - разность температур.

Результаты вычисления погрешностей занесём в таблицу 2.

Видим, что при большом перепаде температур при небольших напряжениях потери на теплопроводность металла играют огромную роль и составляют до половины значения, регистрируемого на вольтметре. Также при небольших напряжениях наблюдаем большую погрешность измерений (13%), при повышении напряжения погрешность уменьшается до порядка 1%

6. По значениям R_0 из п.3 построим график зависимости сопротивления молибденовой нити от температуры.

Погрешность измерения сопротивления при напряжении 0,1 В составляет 13%, примерно такую же погрешность будут иметь и точки на графике и, следовательно, полученный коэффициент (dR/dT).

7. По графику на рис. 3 определим значение температурного коэффициента сопротивления материала нити - молибдена:

$$\alpha = \frac{1}{R_0 C} \frac{dR}{dT} = 0.00414 \text{ K}^{-1}$$

Таблица 2: Погрешности определения мощности потерь, сопротивления проволоки и учёт теплопроводности проволоки

T = 24,1 C				T = 30,5 C, Q+ = 0,00011 Bτ				
sigma Q	sigma R	eps Q, %	eps R, %	sigma Q	sigma R	eps Q, %	eps R, %	eps Q+, %
0,00015	1,53	13,21	13,21	0,000155	1,57	13,07	13,21	9,26
0,00031	0,77	6,60	6,60	0,000311	0,78	6,54	6,60	2,31
0,00077	0,31	2,63	2,63	0,000782	0,32	2,61	2,63	0,37
0,00117	0,21	1,75	1,75	0,001187	0,21	1,73	1,75	0,16
0,00158	0,16	1,30	1,30	0,001605	0,16	1,29	1,30	0,09
0,00201	0,13	1,03	1,03	0,002055	0,13	1,02	1,03	0,05
0,00247	0,11	0,85	0,85	0,002557	0,12	0,83	0,85	0,04

T = 40,3 C, Q+ = 0,00027 Bτ					T = 49,8 C, Q+ = 0,00043 Bτ				
sigma Q	sigma R	eps Q, %	eps R, %	eps Q+, %	sigma Q	sigma R	eps Q, %	eps R, %	eps Q+, %
0,000158	1,58	12,90	12,90	22,00	0,000162	1,62	12,72	12,72	33,78
0,000317	0,79	6,45	6,45	5,50	0,000324	0,81	6,35	6,35	8,42
0,000804	0,32	2,56	2,56	0,86	0,000815	0,33	2,54	2,54	1,34
0,001221	0,22	1,69	1,69	0,37	0,001235	0,22	1,68	1,68	0,59
0,001653	0,17	1,26	1,26	0,21	0,00167	0,17	1,25	1,25	0,32
0,00211	0,14	1,00	1,00	0,13	0,002149	0,14	0,99	0,99	0,20
0,002599	0,12	0,83	0,83	0,09	0,002648	0,12	0,82	0,82	0,13

T = 59,9 C, Q+ = 0,00059 Bτ				
sigma Q	sigma R	eps Q, %	eps R, %	eps Q+, %
0,00017	1,65	12,57	12,57	44,90
0,00033	0,83	6,28	6,28	11,21
0,00083	0,33	2,51	2,51	1,78
0,00126	0,22	1,66	1,66	0,78
0,0017	0,17	1,24	1,24	0,43
0,00217	0,14	0,99	0,99	0,27
0,00267	0,12	0,81	0,81	0,18

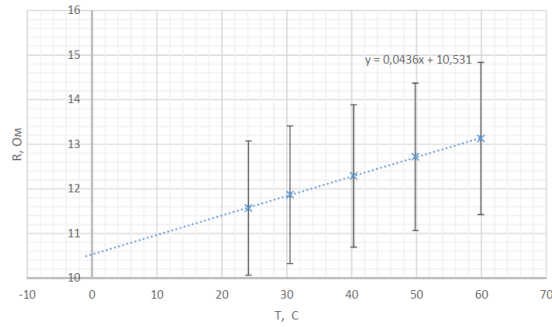


Рис. 3: График зависимости сопротивления нити от температуры

С учётом погрешности величин:

$$\alpha = 0.00414 \pm 0.00076 \text{ K}^{-1}$$

Табличное значение температурного коэффициента молибдена составляет 0.004579 K^{-1} . Полученный нами результат совпадает с табличным в пределах допустимой погрешности.

8. Для каждого значения температуры определим значение теплопроводности газа по формуле, учтём погрешности из предыдущих пунктов

$$\kappa = \frac{dQ}{dR} \frac{dR}{dT} \frac{1}{2\pi L} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

T = 24,1 C:	$\kappa = 0.02186 \pm 0.0040 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$	$\kappa_T = 0.00262 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$
T = 30,5 C:	$\kappa = 0.02290 \pm 0.0042 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$	$\kappa_T = 0.00267 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$
T = 40,3 C:	$\kappa = 0.02409 \pm 0.0044 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$	$\kappa_T = 0.00276 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$
T = 49,8 C:	$\kappa = 0.02309 \pm 0.0043 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$	$\kappa_T = 0.00283 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$
T = 59,9 C:	$\kappa = 0.02390 \pm 0.0044 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$	$\kappa_T = 0.00290 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$

Видим, что значения сходятся с табличными по порядку величины, и, учитывая погрешность измерений, практически совпадают с ними. При больших температурах не прослеживается возрастание полученных экспериментально значений, так как не учтена роль конвекции (если учесть эти потери, значения окажутся ближе к реальным).

Построим на одном графике теоретическую зависимость коэффициента теплопроводности от температуры и полученную экспериментально (рисунок 4). По графику можно оценить влияние конвекции на ход эксперимента. Также наблюдается систематическая ошибка - экспериментальные значения "занижены" примерно на $0,004 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{C}$.

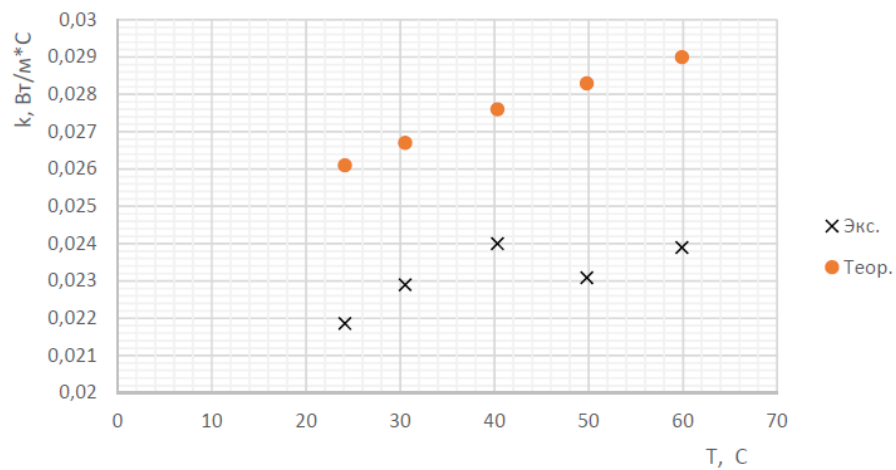


Рис. 4: График зависимости коэффициента теплопроводности воздуха от температуры

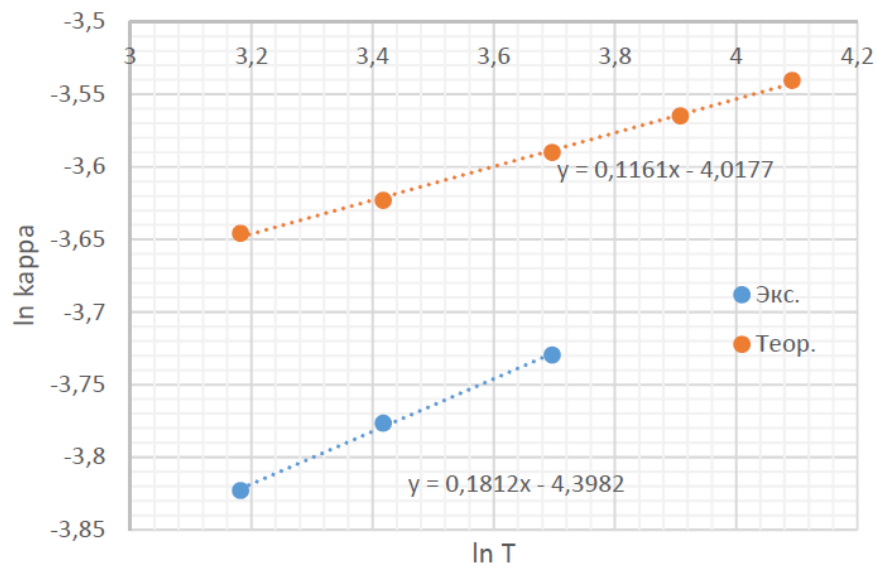


Рис. 5: График зависимости натурального логарифма коэффициента теплопроводности воздуха от натурального логарифма температуры

9. Предполагая, что зависимость коэффициента теплопроводности от температуры имеет вид $\kappa = AT^\beta$, определим показатель степени β . Для этого построим график зависимости $\ln\kappa$ от $\ln T$, тогда $\ln\kappa = \ln A + \beta \ln T$
10. Получили, что коэффициент $\beta \approx 0,2$. Это неверно, так как в теории коэффициент теплопроводности газа прямо пропорционален корню его температуры. Интересно, что необходимое значение не получилось и при обработке теоретических значений. Расхождение, скорее всего, связано с неточностями при выполнении эксперимента и большой погрешностью измерений.

6 Вывод

1. В ходе работы была экспериментально определена теплопроводность воздуха при различных температурах, обнаружена линейная зависимость этих величин.
2. Были оценены погрешности измерения зависимости сопротивления молибденовой нити и мощности, выделяющейся на ней. Обнаружено, что при напряжении порядка 0,1 В погрешность измерений является довольно большой (13%), при дальнейшем увеличении напряжения ошибка составляет около 1%. Основной вклад в величину погрешности вносит относительная погрешность измерения напряжения на эталонном сопротивлении: 0,1 В при классе точности прибора вольтметра 0,01 В
3. Была оценена доля мощности потерь тепла через концы молибденовой проволоки. При повышении разности температур эта величина вносит существенный вклад в погрешность (до 50% при разности температур порядка 40 C)
4. Экспериментально с большой точностью было определено значение температурного коэффициента молибдена: значение, полученное нами, $\alpha = 0.00414 \pm 0.00076 \text{ K}^{-1}$ при табличном значении $\alpha = 0.004579 \text{ K}^{-1}$
5. Было обнаружено влияние конвекции на значения коэффициента теплопроводности воздуха: значения "занижаются"; также обнаружена систематическая ошибка определения коэффициента теплопроводности: значения также оказываются меньше теоретических. Это может быть связано с различными потерями тепла в установке: конвекция, излучение, потери через концы проволоки.
6. Была сделана попытка определить характер зависимости коэффициента теплопроводности газа от температуры. Полученное нами значение ($\kappa = AT^{1/5}$) не сошлось с теоретическим ($\kappa = AT^{1/2}$). Такое различие может быть связано с большими погрешностями при проведении эксперимента.