

Лабораторная работа 2.2.2
Измерение теплопроводности воздуха при разных
давлениях

Вячеслав Ждановский, студент 611 группы ФРКТ
Шамиль Вагабов, студент 611 группы ФРКТ
Станислав Токарев, студент 611 группы ФРКТ

06 марта 2017 г.

Цель работы: измерение перегрева нити при фиксированной мощности нагрева в зависимости от давления воздуха; определение коэффициента теплопроводности при атмосферном давлении, оценка длины свободного пробега, сечения рассеяния и диаметра молекул воздуха; определение области теплопроводности и области теплопередачи (температурного скачка); определение коэффициента аккомодации в области теплопередачи.

В работе используется: прибор для определения теплопроводности газа; форвакуумный насос; манометр; вакуумметр; одинарно-двойной мост; реостат; гальванометр; миллиамперметр; источник постоянного напряжения 3-4 В.

1 Схема экспериментальной установки

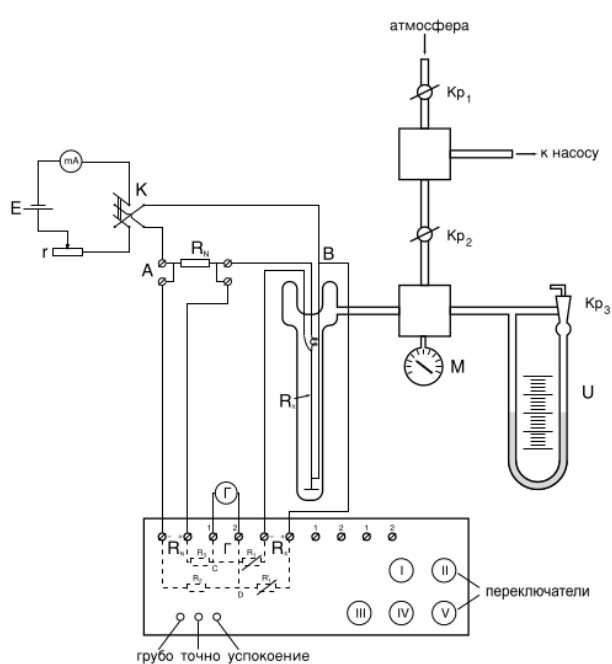


Рис. 1: Схема установки для измерения теплопроводности воздуха

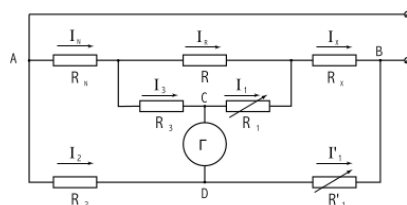


Рис. 2: Схема установки для измерения теплопроводности воздуха

2 Теоретическая часть

Перенос тепла описывается уравнением Фурье:

$$q = -\kappa \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

где q - плотность теплового потока - количество энергии, переносимой через единичную площадку в единицу времени, κ - коэффициент теплопроводности $\frac{dT}{dx}$ - градиент температуры в направлении x . Согласно МКТ коэффициент теплопроводности в газах равен:

$$\kappa = \frac{1}{3} \cdot \lambda \cdot v \cdot n \cdot C_v^1 \quad (2)$$

где C_v^1 - теплоемкость в расчете на одну молекулу ($C_v^1 = \frac{i}{2}$, i - количество степеней свободы молекулы), $v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ - средняя тепловая скорость молекул, λ - длина свободного пробега, а n - концентрация молекул газа. Длина свободного пробега обратно пропорциональна концентрации молекул: $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot n \cdot \sigma}$; σ - сечения рассеяния молекул; $\sigma = \pi d^2$. Поэтому коэффициент теплопроводности газа не зависит от давления. Плотность потока тепла в случае сильно разреженного газа (где происходит теплопередача).

$$q = \frac{1}{4} \cdot n \cdot v \cdot C_v^1 (T_1 - T_2) \quad (3)$$

, где n - число молекул, ударяющихся в единицу времени об единичную площадку. Сопротивление металлической нити увеличивается при увеличении температуры по закону:

$$R = R_0(1 + \alpha t) \quad (4)$$

где t - температура в $^{\circ}C$, R_0 - сопротивление при $t = 0^{\circ}C$. Распространение потока тепла Q от горячей нити по радиусу к холодным стенкам:

$$Q = -2\pi \cdot r \cdot L \cdot \kappa \frac{dT}{dr} \quad (5)$$

где L - высота цилиндра, $2\pi rL$ - площадь цилиндрической поверхности на расстоянии r от нити. После интегрирования по радиусу получаем формулу для разности температур между нитью и стенкой цилиндра:

$$T_{r_n} - T_R = \frac{Q}{2\pi L \kappa} * \ln \frac{R}{r_n} \quad (6)$$

где Q - мощность Джоулева тепла, выделяющегося в нагретой нити, T_n - температура нити, T_R - температура внутренней стенки цилиндра. При низких давлениях закон Фурье нарушается - это область **теплопередачи**. Для этой области поток тепла, согласно (3), будет равен:

$$Q = 2\pi \cdot r_n \cdot L \cdot \frac{1}{4} \cdot n \cdot v \cdot C_v^1 (T_{r_n} - T_R) \quad (7)$$

$$T_{r_n} - T_R = \frac{4Q}{2\pi L n v C_v^1 r_n s} \quad (8)$$

Здесь учтен коэффициент аккомодации s , учитывающий, что температуру нити приобретает только часть молекул, сталкивающихся с нитью. Преобразуем выражение, выразив его через $\kappa = const$ при высоком давлении.

$$T_{r_n} - T_R = \frac{4Q}{2\pi L n v C_v^1 r_n s} = \frac{4\lambda Q}{3r_n s \cdot 2\pi L \kappa} \quad (9)$$

Учет обоих вкладов дает:

$$T_{r_n} - T_R = \frac{Q}{2\pi L \kappa} \cdot \ln \frac{R}{r_n} \cdot \left[1 - \ln \left(1 + \frac{\lambda}{r_n} \right) / \alpha + \frac{4\lambda}{3r_n s} / \alpha \right] \quad (10)$$

3 Ход работы

Параметры установки

$$L = 220 \pm 2 \text{ мм} \quad (11)$$

$$2r = 0,05 \text{ мм} \quad (12)$$

$$2R = 10 \text{ мм} \quad (13)$$

$$\rho_{\text{масла}} = 0,885 \text{ г/см}^3 \quad (14)$$

$$T = 295 \text{ К}, P_0 = 746,2 \text{ торр} \quad (15)$$

$$\alpha = 3,83 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (16)$$

1. Ознакомимся со схемами установки.
2. Включим приборы, впустим воздух в установку.
3. Снимем зависимость напряжения U от величины тока I . 4. Используя (4), найдем сопро-

I, мА	U, мВ	Q, 10^{-6} Вт	R, Ом
70,744	889,2	62905,56	12,56926
66,573	825,3	54942,7	12,39692
59,36	722,63	42895,32	12,17369
50,927	607,9	30958,52	11,93669
45,461	537,4	24430,74	11,82112
39,473	462,29	18247,97	11,71155
31,202	361,79	11288,57	11,59509
26,772	309,12	8275,761	11,54639

тивление при комнатной температуре $R_0 = 11,36 \text{ Ом}$. Произведем аналогичные измерения при разных давлениях и построим график зависимости $t(Q)$

I, мА	U, мВ	Q, 10^{-6} Вт	R, Ом
71,845	873,17	62732,9	12,15352
65,345	785,15	51305,63	12,01546
55,196	653,38	36063,96	11,83745
43,707	510,27	22302,37	11,67479
36,126	418,9	15133,18	11,59553
30,77	355,55	10940,27	11,55509
26,785	309,06	8278,172	11,53855

Таблица 1: P=95,403 Па

6. Построим зависимость t от Q .
7. Построим зависимость t от $\frac{1}{P}$ и найдем из него $\kappa = 2,53 \cdot 10^{-2} \frac{\text{В}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

I, мА	U, мВ	Q, 10^{-6} Вт	R, Ом
72,46	879,95	63761,18	12,14394
65,798	791,55	52082,41	12,03
58,55	697,81	40856,78	11,91819
43,845	514,75	22569,21	11,74022
36,209	422,51	15298,66	11,66865
30,825	358,4	11047,68	11,62693
26,826	311,225	8348,922	11,60162

Таблица 2: P=130,095 Па

I, мА	U, мВ	Q, 10^{-6} Вт	R, Ом
72,615	877,533	63722,06	12,08473
60,276	717,91	43272,74	11,91038
43,85	514,61	22565,65	11,73569
36,202	422,7	15302,59	11,67615
30,817	358,73	11054,98	11,64065
26,817	311,57	8355,373	11,61838
23,737	275,43	6537,882	11,6034

Таблица 3: P=225,498 Па

I, мА	U, мВ	Q, 10^{-6} Вт	R, Ом
72,865	872,36	63564,51	11,97228
64,017	761,03	48718,86	11,88794
43,84	514,436	22552,87	11,7344
36,186	423,07	15309,21	11,69154
30,799	359,313	11066,48	11,66639
26,802	312,246	8368,817	11,6501
23,725	276,14	6551,422	11,6392

Таблица 4: P=780,57 Па

I, мА	U, мВ	Q, 10^{-6} Вт	R, Ом
72,789	873,63	63590,65	12,00223
63,985	761,8	48743,77	11,90592
55,52	656,68	36458,87	11,82781
43,83	514,52	22551,41	11,73899
36,182	493,026	17838,67	13,62628
26,8	312,125	8364,95	11,64646
23,722	275,993	6547,106	11,63447

Таблица 5: P=745,878 Па

4 Контрольные вопросы

1. Основное изменение температуры происходит в области прилежащей к нити, практически - на расстояниях порядка нескольких её радиусов. Поэтому наиболее резкие изменения характера процесса теплопроводности лежат в том диапазоне давлений, когда длина сво-

I, мА	U, мВ	Q, 10^{-6} Вт	R, Ом
72,763	874,2	63609,41	12,01435
63,975	762,13	48757,27	11,91293
58,632	695,265	40764,78	11,85812
45,776	537,755	24616,27	11,74753
37,504	438,5	16445,5	11,69209
31,752	370,23	11755,54	11,66005
27,522	320,352	8816,728	11,63985

Таблица 6: P=581,091 Па

I, мА	U, мВ	Q, 10^{-6} Вт	R, Ом
72,675	875,26	63609,52	12,04348
60,275	716,73	43200,9	11,891
55,501	657,22	36476,37	11,84159
43,837	514,6	22558,52	11,73894
36,191	422,895	15304,99	11,68509
30,806	359,009	11059,63	11,65387
26,808	311,885	8361,013	11,63403

Таблица 7: P=312,228 Па

бодного пробега молекул газа приближается к радиусу нити. 2. Молекулы, отстоящие от стенки больше чем на несколько лямбд (длин свободного пробега молекул), с ней не соударяются и сталкиваются только между собой. Теплопередача на таких расстояниях ничем не отличается от теплопередачи в ещё более удаленных от стенки областях и подчиняется закону Фурье (лабник стр 119 формула (1)). Поэтому можно ожидать, что величина температурного скачка будет пропорциональна ширине аномальной области, т.е. лямбде, и, следовательно, обратно пропорциональна давлению P

t, K	Q, 10 ⁻⁶ Вт
27,79355	62905,56
23,83237	54942,7
18,70164	42895,32
13,25465	30958,52
10,59835	24430,74
8,079967	18247,97
5,403276	11288,57
4,284001	8275,761
18,23826	62732,9
15,06492	51305,63
10,97369	36063,96
7,235064	22302,37
5,413313	15133,18
4,483831	10940,27
4,103715	8278,172
18,018	63761,18
15,3992	52082,41
12,82935	40856,78
8,73895	22569,21
7,093873	15298,66
6,134993	11047,68
5,55331	8348,922
16,65719	63722,06
12,64983	43272,74
8,634802	22565,65
7,266357	15302,59
6,450486	11054,98
5,938486	8355,373
5,594362	6537,882
14,0725	63564,51
12,13401	48718,86
8,605105	22552,87
7,620025	15309,21
7,041915	11066,48
6,667634	8368,817
6,417073	6551,422
14,76082	63590,65
12,54724	48743,77
10,75207	36458,87
8,710687	22551,41
52,08781	17838,67
6,583846	8364,95
6,308478	6547,106
15,03944	63609,41
12,70857	48757,27
11,4486	40764,78
8,906967	24616,27
7,632621	16445,5
6,896373	11755,54
6,432072	8816,728
15,70903	63609,52
12,20442	43200,9
11,06876	36476,37
8,709548	22558,52
7,471763	15304,99
6,754177	11059,63
6,298201	8361,013

Таблица 8: Зависимость t от Q

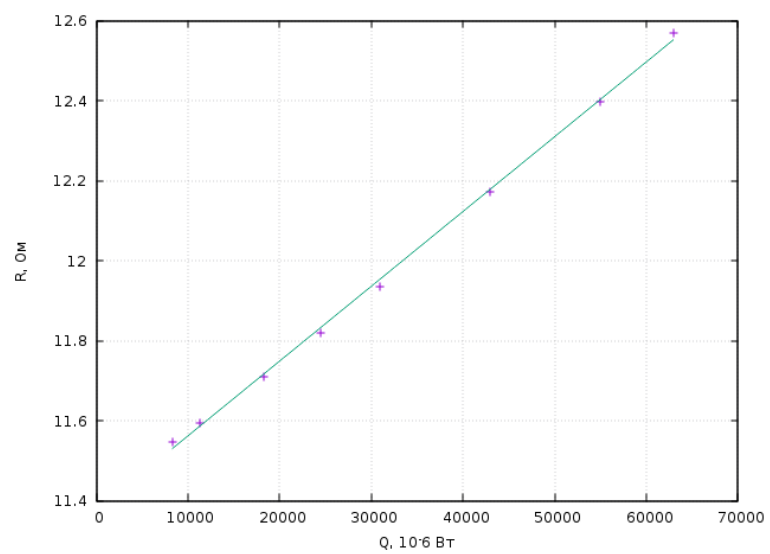


Рис. 3: Зависимость R от Q

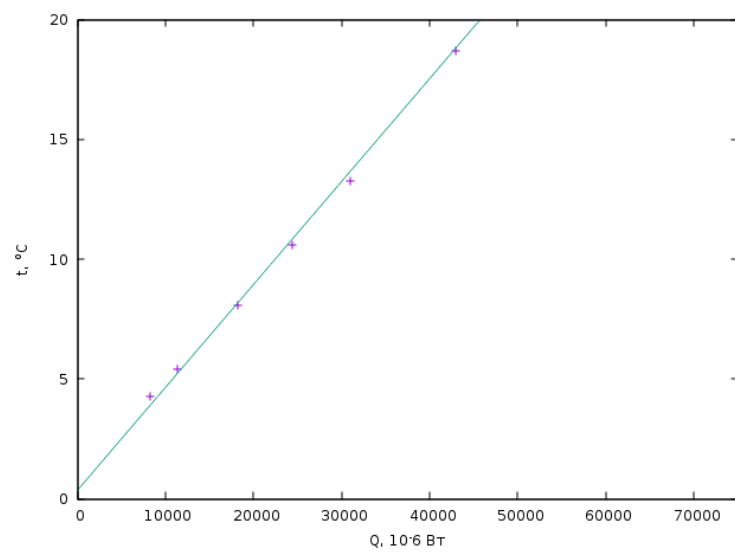


Рис. 4: Зависимость t от Q для первых трех давлений

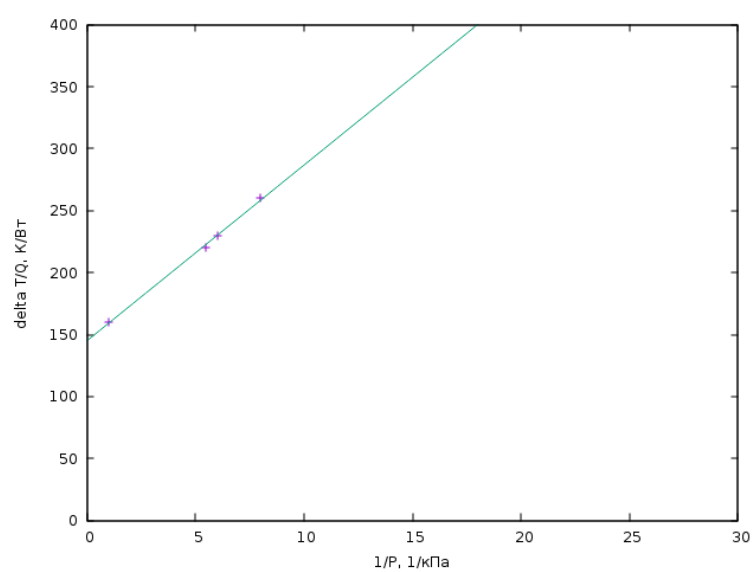


Рис. 5: Зависимость температуры нити от давления воздуха