

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»  
(ННГУ)

**Высшая школа общей и прикладной физики**

**Отчет по лабораторной работе № 134**

**«Измерение коэффициента теплопроводности воздуха»**

**Выполнил:**

студент 1 курса ВШ ОПФ

Тарханов Андрей Алексеевич

Нижний Новгород

2023

Цель работы: изучение теплопроводности воздуха как одного из явлений переноса в газах.

### Теоретическая часть

Теплопередача в газах осуществляется тремя способами: тепловым излучением (перенос энергии электромагнитными волнами), конвекцией (перенос энергии за счёт перемещения слоёв газа в пространстве из областей с более высокой температурой в области с низкой температурой) и теплопроводностью.

При теплопроводности осуществляется непосредственная передача энергии от молекул с большей энергией к молекулам с меньшей энергией. Для стационарного процесса, при котором разность температур в слое газа не изменяется со временем, количество теплоты  $dQ$ , которое переносится за время  $dt$  через площадку  $S$ , перпендикулярно к направлению  $r$  переноса энергии определяется по закону Фурье:

$$dQ = -k \frac{dT}{dr} S dt, (1)$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности;  $\frac{dT}{dr}$  – градиент температуры. Для идеального газа

$$k = \frac{1}{3} \rho \lambda \langle v \rangle C_V (2)$$

где  $\rho$  – плотность газа;  $\lambda$  – средняя длина свободного пробега;  $\langle v \rangle$  – средняя скорость теплового движения молекул, равная  $\sqrt{\frac{8RT}{\pi m}}$ ,  $C_V$  – удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме.

Рассмотрим два коаксиальных цилиндра, пространство между которыми заполнено газом. Если внутренний цилиндр нагревать, а температуру наружного цилиндра поддерживать постоянной (ниже температуры нагревателя), то в кольцевом слое газа возникает радиальный тепловой поток, направленный от внутреннего цилиндра к наружному. При этом температура слоёв газа, прилегающих к стенкам цилиндров, равна температуре стенок. Выделим в газе кольцевой слой радиусом  $r$ , толщиной  $dr$  и длиной  $L$ . По закону Фурье (1) мощность тепловых потерь  $P_T$ , то есть количество теплоты, которое проходит через этот слой за одну секунду, можно записать в виде

$$P_T = -k \frac{dT}{dr} S = -k \frac{dT}{dr} 2\pi r L. (3)$$

Разделяя переменные, получим

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2\pi k L}{P_T} dT.$$

Считая, что диаметр и температура внутреннего цилиндра равны соответственно  $d$  и  $t_1$ , а внешнего  $D$  и  $T_2$ , проинтегрируем дифференциальное уравнение:

$$\int_{d/2}^{D/2} \frac{dr}{r} = -\frac{2\pi kL}{P_T} \int_{T_1}^{T_2} dT, \text{ то есть}$$

$$\ln \frac{D}{d} = \frac{2\pi kL}{P_T} (T_1 - T_2). \quad (4)$$

Из уравнения (4) получим формулу для определения коэффициента теплопроводности газа

$$k = \frac{P_T \ln \frac{D}{d}}{2\pi L(T_1 - T_2)} \quad (5)$$

Формула (5) получена в предположении, что теплота переносится от внутреннего цилиндра к наружному только благодаря теплопроводности. Это предположение достаточно обосновано, поскольку поток лучистой энергии при невысоких температурах и малом диаметре нагревателя минимален.

Внутренним цилиндром в работе служит проволока, которая нагревается электрическим током. Тогда после установления стационарного режима мощность тепловых потерь можно принять равной тепловой мощности, выделяющейся при протекании по проволоке электрического тока

$$P_T = I_H U_H,$$

где  $I_H$  – ток через проволоку,  $U_H$  – падение напряжения на проволоке.

Если последовательно с проволокой включить эталонный резистор  $R_{\text{Э}}$ , то  $I_H = \frac{U_R}{R_{\text{Э}}}$ ,

$$\text{и тогда } P_T = \frac{U_R U_H}{R_{\text{Э}}}, \quad (6)$$

где  $U_R$  – падение напряжения на эталонном резисторе. Используя равенство (6) в формуле (5), получим

$$k = \frac{U_R U_H \ln \frac{D}{d}}{2\pi L R_{\text{Э}} \Delta T}. \quad (7)$$

Здесь  $D$  и  $d$  – диаметры наружного цилиндра и проволоки;  $\Delta T = T_H - T_T$  – разность температур проволоки и наружного цилиндра (трубки). Температуру трубки  $T_T$  можно принять равной температуре окружающего воздуха.

Для вычисления разности температур  $\Delta T$  в слое газа напомним формулы, по которым определяют сопротивление проволоки при температуре окружающего воздуха и в нагретом состоянии:

$$R_{H0} = R_0(1 + \alpha t_0), R_H = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала проволоки, а  $R_0$  – сопротивление проволоки при  $t = 0^\circ\text{C}$ . Исключив из этих равенств  $R_0$ , найдём

$$\Delta T = t - t_0 = \frac{R_H - R_{H0}}{\alpha R_{H0}} (1 + \alpha t_0)$$

Учитывая, что  $R_H = \frac{U_H}{I_H}$ ,  $I_H = \frac{U_R}{R_{\text{Э}}}$ ,  $R_{H0} = \frac{U_{H0}}{I_{H0}}$ ,  $I_{H0} = \frac{U_{R0}}{R_{\text{Э}}}$ , получаем

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_R} \frac{U_{H0}}{U_{R0}}\right)(1+\alpha t_0)}{\frac{U_{H0}}{U_{R0}}\alpha}. \quad (8)$$

Здесь  $U_H$ ,  $U_{H0}$  - падение напряжения на проволоке соответственно в нагретом состоянии и при температуре  $t_0$  окружающего воздуха;  $U_R$ ,  $U_{R0}$  - падение напряжения на эталонном резисторе соответственно при нагретой проволоке и при температуре окружающего воздуха  $t_0$ .

### Экспериментальная часть:

Включив установку тумблером «Сеть», и включив тумблер «Нагрев», начнём увеличивать напряжение на проволоке. Нажав кнопку « $U_R$ » (режим измерения падения напряжения на эталонном резисторе) и с помощью регулятора «Нагрев» установим падение напряжения на эталонном резисторе  $U_{R0}$  не более 1В. При этом температура проволоки остаётся практически неизменной («ненагревающий» ток). Затем при том же положении регулятора «Нагрев» нажмём кнопку « $U_H$ » (режим измерения падения напряжения на проволоке) и зарегистрируем значение напряжения  $U_{H0}$ . Опыт проведём пять раз для близких значений к  $U_{H0}$  и  $U_{R0}$ . Результаты занесём в таблицу.

№ опыта	$U_{R0}$ , В	$U_{H0}$ , В	$U_{H0}/U_{R0}$	$(U_{H0}/U_{R0})_{ср.}$	$t_0$ , °С
1	0,71	0,18	0,25	0,25	23
2	0,79	0,2	0,25		
3	0,91	0,23	0,25		
4	0,94	0,24	0,26		
5	1	0,26	0,26		

Нажмём кнопку « $U_R$ » и с помощью регулятора нагрев установим падение напряжения на эталонном резисторе  $U_R$  в диапазоне 5-8В. Затем нажмём кнопку « $U_H$ ». Для стабилизации теплового режима необходимо подождать две минуты, после чего определить падение напряжения на проволоке  $U_H$ . Опыт был повторён четыре раза для четырёх различных значений  $U_R$ .

№ опыта	$U_R$ , В	$U_H$ , В	$U_H/U_R$	$U_{H0} * U_{R0}$ , В <sup>2</sup>	$\Delta T$ , К	$k$ , Вт/мК	$k_{ср}$ , Вт/мК
1	7	1,9	0,27	13,3	17,85	0,042	0,046
2	7,5	2,05	0,27	15,4	18,90	0,046	
3	7,9	2,16	0,27	17,1	18,90	0,051	

Погрешности:

$$dT = \frac{\Delta U \frac{U_H + U_R}{U_R^2} + \Delta U \frac{U_{R0} + U_{H0}}{U_{R0}^2}}{\frac{U_H}{U_R} - \frac{U_{H0}}{U_{R0}}} + \frac{\Delta U}{U_{H0}} + \frac{\Delta U}{U_{R0}}$$

$$\Delta k = dT + \frac{\Delta U}{U_R} + \frac{\Delta U}{U_H}$$

Тогда относительные погрешности равны:

$$dT_1=0,87; \Delta k_1=0,88$$

$$dT_2=0,95; \Delta k_2=0,96$$

$$dT_3=0,96; \Delta k_3=0,96$$

Вывод: в результате проделанной работы мы вычислили коэффициент теплопроводности воздуха. По нашим подсчётам он получился равным  $0,046 \pm 0,044$  Вт/мК.