

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

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

Теория метода

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

Теплопроводность – это процесс передачи теплоты от более нагретого слоя газа к менее нагретому за счет хаотичного теплового движения молекул. 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 δQ , которая переносится вследствие теплопроводности за время dt через поверхность площадью S , перпендикулярную к направлению переноса энергии, в направлении уменьшения температуры, определяется по закону Фурье:

$$\delta Q = -\chi \cdot \frac{dT}{dr} \cdot S \cdot dt, \quad (3.1)$$

где χ – коэффициент теплопроводности, dT/dr – градиент температуры.

Для идеального газа

$$\chi = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \nu < \nu_T > \cdot C_V, \quad (3.2)$$

здесь ρ – плотность газа; λ – средняя длина свободного пробега молекулы; $\nu < \nu_T >$ – средняя скорость теплового движения молекул, $\nu < \nu_T > = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$; C_V – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

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 поток теплоты, направленный от внутреннего цилиндра к наружному. При этом температура слоев газа, прилегающих к стенкам цилиндров, равна температуре стенок. Выделим в газе кольцевой слой радиусом r , толщиной dr и длиной L . По закону Фурье (3.1) тепловой поток $q = \delta Q / dt$, т.е. количество теплоты, которая проходит через этот слой за одну секунду, можно записать в виде

$$q = -\chi \frac{dT}{dr} \cdot S = -\chi \frac{dT}{dr} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L. \quad (3.3)$$

Разделив переменные, получим

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} \cdot dT.$$

Тогда

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} \int_{T_1}^{T_2} dT,$$

или

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} \cdot (T_1 - T_2). \quad (3.4)$$

Здесь T_1 , R_1 и T_2 , R_2 – соответственно температуры поверхностей и радиусы внутреннего и наружного цилиндра.

Из уравнения (3.4) получим формулу для определения коэффициента теплопроводности газа:

$$\chi = \frac{q \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}. \quad (3.5)$$

Формулу (3.5) получили в предположении, что теплота переносится от внутреннего к наружному цилиндру только благодаря теплопроводности. Это предположение достаточно обосновано, поскольку поток лучистой энергии при невысоких температурах и малом диаметре нагревателя составляет незначительную часть количества теплоты, которая переносится, а конвекция устраняется подбором диаметра наружного цилиндра и его вертикальным расположением в экспериментальной установке.

Внутренним цилиндром может служить тонкая проволока (нить), обычно вольфрамовая, которая нагревается электрическим током. Тогда после установления стационарного режима тепловой поток можно принять равным мощности электрического тока, протекающего через проволоку

$$q = J_N U_N,$$

где J_N – ток через проволоку; U_N – падение напряжения на проволоке.

Если последовательно с проволокой включить эталонный резистор сопротивлением R_p , то

$$J_N = \frac{U_p}{R_p}.$$

и тогда

$$q = \frac{U_p \cdot U_N}{R_p}, \quad (3.6)$$

где U_p – падение напряжения на эталонном резисторе.

Используя равенство (3.6) в формуле (3.5), получим

$$\chi = \frac{U_p \cdot U_N \cdot \ln \frac{d}{D}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_p \cdot \Delta T}, \quad (3.7)$$

здесь D и d – диаметры наружного цилиндра и проволоки; $\Delta T = T_N - T_T$ – разность температур проволоки и наружного цилиндра (трубки).

Температуру трубки T_r можно принять равной температуре окружающего воздуха. Для вычисления разности температур ΔT в слое газа напишем формулы, по которым определяются сопротивления проволоки при температуре окружающей воздуха и в нагретом состоянии:

$$R_{H,0} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_0),$$

$$R_H = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t),$$

где R_0 – сопротивление проволоки при $t = 0$ °С; α – температурный коэффициент сопротивления материала проволоки.

Исключив из этих равенств R_0 , найдем

$$\Delta T = t - t_0 = \frac{R_H - R_{H,0}}{\alpha \cdot R_{H,0}} (1 + \alpha \cdot t_0)$$

Учитывая, что $R_H = \frac{U_H}{J_H}$, $J_H = \frac{U_P}{R_P}$ и $R_{H,0} = \frac{U_{H,0}}{J_{H,0}}$, $J_{H,0} = \frac{U_{P,0}}{R_P}$, получим

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_P} - \frac{U_{H,0}}{U_{P,0}} \right) \cdot (1 + \alpha \cdot t_0)}{\frac{U_{H,0}}{U_{P,0}} \cdot \alpha}, \quad (3.8)$$

где U_H , $U_{H,0}$ – падение напряжения на проволоке соответственно в нагретом состоянии и при температуре окружающего воздуха t_0 ; U_P , $U_{P,0}$ – падение напряжения на эталонном резисторе соответственно при нагретой проволоке и при температуре окружающего воздуха t_0 .

Экспериментальная установка

Для определения коэффициента теплопроводности воздуха предназначена экспериментальная установка ФПТТ-3, общий вид которой показан на рисунке 3.1.

Рабочий элемент установки представляет собой стеклянную трубку, заполненную воздухом, вдоль оси которой натянута вольфрамовая проволока 4. Температура трубки в ходе эксперимента поддерживается постоянной, благодаря принудительной циркуляции воздуха между трубкой и кожухом блока рабочего элемента 3, которая осуществляется с помощью вентилятора, находящегося в блоке рабочего элемента. Температура воздуха вокруг трубки измеряется датчиком температуры и регистрируется цифровым термометром. Значения падения напряжения на эталонном резисторе U_P и на проволоке U_H измеряются цифровым вольтметром. Значение напряжения на проволоке устанавливается регулятором "Нагрев", который находится на передней панели блока приборов 1. Геометрические размеры рабочего элемента – диаметр трубки D , диаметр проволоки d , длина трубки L , температурный коэффициент сопротивления материала проволоки α указаны на рабочем месте.

Порядок выполнения работы.

1. Включить установку тумблером "Сеть". Включить тумблер "Нагрев".
2. Нажать кнопку " U_P " (режим измерения падения напряжения на эта-

лонном резисторе) и с помощью регулятора "Нагрев" установить падение напряжения не более 0,06 В, при котором температура проволоки остается практически неизменной ("ненагревающий" ток).

3. Нажать кнопку " U_H " (режим измерения падения напряжения на проволоке) и зарегистрировать значение напряжения.
4. Повторить измерение по пп. 2-3 для 3 значений напряжения $U_{P,0}$. Вычислить среднее значение $U_{P,0}$ и $U_{H,0}$ и результаты занести в таблицу 3.1.
5. Нажать кнопку " U_P " и с помощью регулятора "Нагрев", установить падение напряжения на эталонном резисторе U_P в диапазоне 0,3...6,5 В.
6. Подождав 2 минуты, что необходимо для стабилизации теплового режима рабочего элемента, нажать кнопку " U_H " и определить падение напряжения на проволоке U_H .

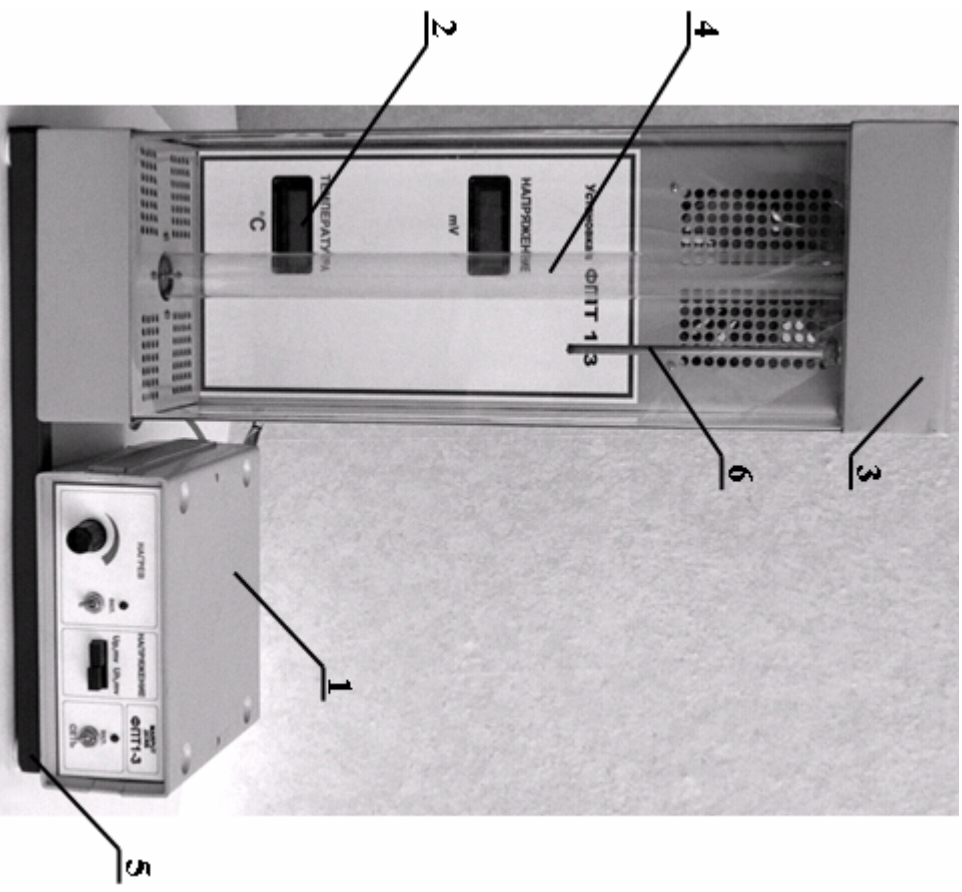


Рисунок 3.1 Общий вид экспериментальной установки ФПТТ-3

- 1 – блок приборов; 2 – цифровой термометр; 3 – блок рабочего элемента;
- 4 – вольфрамовая проволока; 5 – стойка; 6 – датчик температуры (термопара).

7. Повторить измерения по пп. 5-6 для 3-5 значений падения напряжения U_p . Результаты занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

№ изм.	U_{p0} МВ	U_{H0} МВ	t_0 °С	U_p МВ	U_H МВ	ΔT К	χ , Вт/(м·К)
--------	----------------	----------------	-------------	-------------	-------------	-----------------	----------------------

8. Установить ручку регулятора "Нагрев" на минимум. Отключить тумблер "Нагрев", после чего отключить установку тумблером "Сеть".

Обработка результатов измерения

1. Для каждого измерения по формуле (3.8) рассчитать разность температур ΔT , а по формуле (3.7) – коэффициент теплопроводности χ и занести полученные значения в таблицу 3.1.
2. Найти среднее значение коэффициента теплопроводности воздуха $\chi < \chi >$.
3. Оценить погрешность результатов измерения.

Контрольные задания

1. Расскажите о возможных способах передачи теплоты.
2. В чем суть явления теплопроводности? Какая величина переносится при теплопроводности?
3. Какая величина называется тепловым потоком? В каких единицах СИ она измеряется?
4. Какой формулой описывается поток теплоты, перенесенной при теплопроводности?
5. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности? В каких единицах СИ измеряется эта величина?
6. Напишите формулу для коэффициента теплопроводности идеального газа.
7. Объясните понятие градиента температуры.
8. В чем заключается метод нагретой нити для определения коэффициента теплопроводности газов?
9. Выведите расчетную формулу для определения коэффициента теплопроводности методом нагретой нити.
10. Объясните назначение эталонного резистора в схеме экспериментальной установки.
11. Как определяется разность температур проволоки и наружной трубки в данной работе?
12. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул газа, используя явление теплопроводности?