

134

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО**

Радиофизический факультет

Кафедра общей физики

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА**

(Описание к лабораторной работе)

Нижний Новгород, 2004

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

ВВЕДЕНИЕ

Теплопередача 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 теплопередачи от более нагретого слоя газа к менее нагретому за счет 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 dQ , которое переносится за время dt через площадку S , перпендикулярную к направлению r переноса энергии, определяется по закону Фурье:

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

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

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

где ρ - плотность газа; λ - средняя длина свободного пробега; $\langle v \rangle$ - средняя скорость теплового движения молекул, равная $\sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$, 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 тепловой поток, направленный от внут-

ренного 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 (1) мощность тепловых потерь P_T , то есть количество теплоты, которое проходит через этот слой за одну секунду, можно записать в виде

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

Разделяя переменные, получим

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

Считая, что диаметр и температура внутреннего цилиндра равны соответственно d и T_1 , а внешнего D и T_2 , проинтегрируем дифференциальное уравнение:

$$\int_{d/2}^{D/2} \frac{dr}{r} = -\frac{2\pi \kappa L}{P_T} \int_{T_1}^{T_2} dT,$$

то есть

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

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

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

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 составляет незначительную часть переносимого количества теплоты, а конвекция устраняется подбором диаметра наружного цилиндра и его вертикальным расположением в экспериментальной установке.

Внутренним цилиндром в работе служит проволока (нить), в данном случае вольфрамовая, 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_{Σ} , то $I_H = \frac{U_R}{R_{\Sigma}}$,

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

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

$$\kappa = \frac{U_R U_H \ln \frac{D}{d}}{2\pi L R_{\Sigma} \Delta T}.$$

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 ΔT в слое газа напишем формулы, по которым определяют сопротивление проволоки при температуре окружающего воздуха и в нагретом состоянии:

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

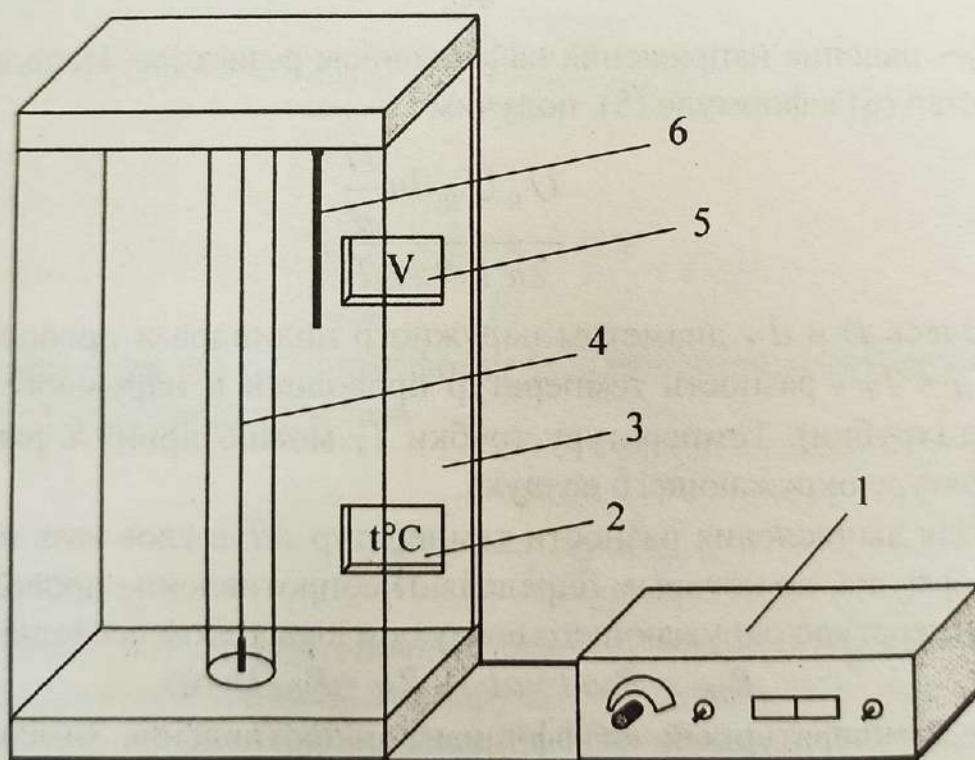
где α - температурный коэффициент сопротивления материала проволоки, а R_0 - сопротивление проволоки при $t = 0^\circ \text{C}$. Исключив из этих равенств R_0 , найдем

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

Учитывая, что $R_H = \frac{U_H}{I_H}$, $I_H = \frac{U_R}{R_0}$, $R_{H0} = \frac{U_{H0}}{I_{H0}}$, $I_{H0} = \frac{U_{R0}}{R_0}$,
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 .



Общий вид экспериментальной установки

- 1 - блок приборов; 2 - цифровой термометр; 3 - блок рабочего элемента; 4 - вольфрамовая проволока; 5 - цифровой вольтметр; 6 - датчик температуры

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

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

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 в кожухе (а, следовательно, и температура самой трубки) измеряется цифровым термометром 2.

Падение напряжения на эталонном резисторе U_R и на проволоке U_H измеряется цифровым вольтметром. Величина напряжения на проволоке регулируется ручкой "Нагрев", которая выведена на переднюю панель блока приборов 1. Диаметр трубки D , диаметр проволоки d , длина трубки L и 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_R " (режим измерения падения напряжения на эталонном резисторе) и с помощью регулятора "Нагрев" установить падение напряжения на эталонном резисторе U_{R0} не более 1В. При этом температура проволоки остается практически неизменной ("ненагревающий" ток).
3. При том же положении регулятора "Нагрев" нажать кнопку " U_H " (режим измерения падения напряжения на проволоке) и зарегистрировать значение напряжения U_{H0} .
4. Повторить измерения по п.п. 2-3 для 3-5 близких значений U_{H0} и U_{R0} . Все результаты занести в таблицу 1.

5. Нажать кнопку " U_R " и с помощью регулятора "Нагрев" установить падение напряжения на эталонном резисторе U_R в диапазоне 5 - 8 В.

6. Нажать кнопку " U_H " и, подождав две минуты (что необходимо для стабилизации теплового режима), определить падение напряжения на проволоке U_H .

7. Повторить измерения по пп. 5 - 6 для 3-5 близких значений падения напряжения U_R . Результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1.

№	U_{R0} , В	U_{H0} , В	t_0 , °С	U_R , В	U_H , В	ΔT , К	κ , Вт/мК
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							

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 (8) рассчитать разность температур ΔT , а по формуле (7) - коэффициент теплопроводности κ . Занести полученные значения в таблицу 1.

2. Найти среднее значение коэффициента теплопроводности воздуха.

3. Оценить погрешность результатов измерения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чём суть явления теплопроводности? Какая величина переносится при теплопроводности?
2. Что называется тепловым потоком? В каких единицах он измеряется?
3. Какой формулой описывается поток теплоты, перенесенной при теплопроводности?
4. Напишите формулу для коэффициента теплопроводности идеального газа.
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. Оцените среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы газа, используя полученный в работе коэффициент теплопроводности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 1974, 1979, 1990.
2. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1987.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1987.