

## Лабораторная работа 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ $C_p/C_v$ МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

*Цель работы:* опытным путём определить значение коэффициента Пуассона (показателя адиабаты), сравнить полученное значение с теоретическим значением (для двухатомного газа).

*Приборы и принадлежности:* жидкостный манометр, закрытый стеклянный баллон с трехходовым краном, насос.

#### Введение

Согласно первому началу термодинамики, количество энергии, сообщенное системе в процессе теплообмена  $dQ$ , идёт на изменение ее внутренней  $dU$  и на совершение системной работы  $dA$  против внешних сил:

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (2.1)$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания одного киломоля газа на один градус, определяется молярной теплоемкостью –  $C_m$ .

Величина теплоёмкости зависит от условий нагревания. Различают два вида теплоемкостей:  $C_p$  – молярная теплоёмкость при постоянном давлении и  $C_v$  – молярная теплоёмкость при постоянном объёме связанных между собой уравнением

$$C_p = C_v + R,$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная, численно равная работе, совершаемой при нагревании одного моля идеального газа на один кельвин при постоянном давлении.

Процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой ( $\delta Q = 0$ ), называется адиабатическим. Он описывается уравнением Пуассона:

$$pV^\gamma = const,$$

где  $\gamma = C_p/C_v$ .

Работа адиабатического процесса, как следует из первого начала термодинамики (2.1), совершается только за счёт изменения внутренней энергии:

$$\delta A = dU.$$

Полная работа адиабатического процесса может быть определена по формуле

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (2.2)$$

### Основы теории. Методика выполнения эксперимента и описание установки

Метод определения  $C_p/C_v$ , используемый в работе, основан на процессе адиабатического расширения воздуха.

Установка (рис. 2.1) состоит из толстостенного баллона 2, соединенного с нагнетательным насосом Комовского 3 и открытым  $U$  – образным водяным манометром 1 и клапаном 4.



Рис. 2.1. Схема установки

Обозначим массу газа в баллоне при атмосферном давлении –  $m_1$ .

Если соединить баллон с насосом и накачать воздух, то давление в баллоне повысится и станет равным  $p_1 = p_0 + h_1$ , где  $h_1$  – избыток над атмосферным давлением  $p_0$ , измеряемый манометром ( $p_0$  и  $h_1$

должны быть выражены в одинаковых единицах).

*Примечание.* Так как при нагнетании воздух в баллоне нагревается, измерять избыток давления  $h_1$  следует тогда, когда температура воздуха в баллоне станет равной комнатной (спустя 1–2 мин).

Газ массой  $m_1$  теперь будет занимать объём  $V_1$  меньший объёма баллона. Его состояние характеризуется параметрами:  $p_1, V_1, T_1$  (рис. 2.2).

Если на короткое время с помощью крана сообщить, что баллон с атмосферой, то воздух будет быстро (т.е. адиабатически) расширяться. Часть воздуха массой  $\Delta m$  выйдет из баллона. Оставшийся воздух массой  $m_1$ , который занимал перед открытием крана часть объёма баллона, снова займёт весь объём  $V_k = V_2$ . Давление в баллоне станет равным атмосферному ( $p_2 = p_0$ ). Температура воздуха в результате его адиабатического расширения окажется ниже комнатной. Таким образом, в момент закрытия крана воздух находится в состоянии II ( $p_2, V_2, T_2$ ). Для массы газа, согласно закону Пуассона, получим

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma. \quad (2.3)$$

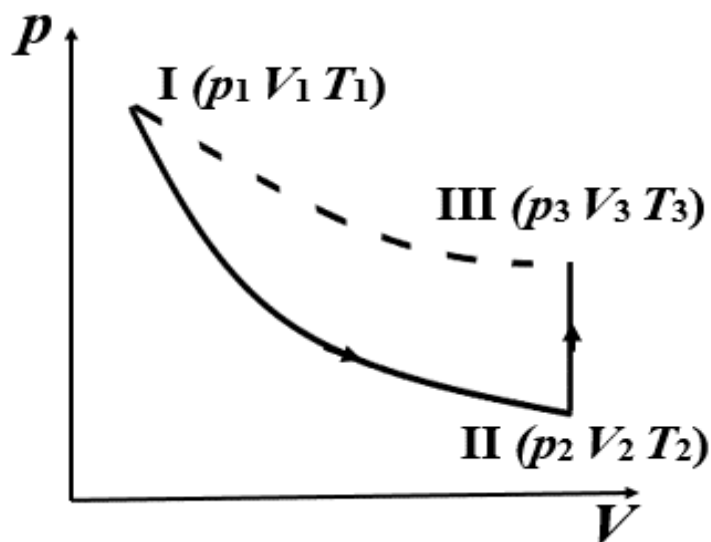


Рис. 2.2. Переходы в газе

В результате теплообмена, спустя 1–2 мин после того, как кран закрыт, температура воздуха постепенно возрастает до

первоначальной комнатной  $T_1$ , давление увеличивается до  $p_3 = p_0 + h_2$ , где  $h_2$  – избыток давления, измеренный манометром. Газ переходит в состояние III ( $p_3, V_2, T_1 = T_k$ ) при постоянном объёме.

Учитывая, что температура в состоянии I и III одинаковая, то по закону Бойля–Мариотта:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_3}{p_1}. \quad (2.4)$$

Сравнивая равенства (2.3) и (2.4), получим

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{p_3}{p_1} \right)^\gamma.$$

Логарифмируем это выражение

$$\lg p_2 - \lg p_1 = \gamma(\lg p_3 - \lg p_1)$$

и решаем его относительно

$$\gamma = \frac{\lg p_2 - \lg p_1}{\lg p_3 - \lg p_1}.$$

Учитывая, что  $p_1 = p_0 + h_1; p_2 = p_0; p_3 = p_0 + h_2$ , получим

$$\gamma = \frac{\lg p_0 - \lg(p_0 + h_1)}{\lg(p_0 + h_2) - \lg(p_0 + h_1)}.$$

Так как давления незначительно отличаются друг от друга, то приближенно в последнем выражении можно логарифмы заменить числами

$$\gamma = \frac{p_0 - p_0 - h_1}{p_0 + h_2 - p_0 - h_1} \text{ или } \gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (2.5)$$

Для вычисления работы адиабатического расширения воспользуемся формулой (2.3). Так как по закону Пуассона

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

то формула (2.3) примет вид

$$A = \frac{(p_0 + h_1)V_1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_0}{p_0 + h_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right], \quad (2.6)$$

где  $V \sim V_k$ , указанный на установке.

## Выполнение работы

1. С помощью насоса Комовского нагнетать воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней жидкости в манометре не станет равной 20–30 см.
2. Подождать до тех пор, пока уровни жидкости в манометре не установятся. Отсчитать разность уровней жидкости в коленах манометра  $h_1$  (отсчёт производить по нижнему краю мениска).
3. Один раз нажать на клапан и выпустить воздух из баллона.
4. Выждав 1–2 мин, пока воздух в баллоне нагреется до комнатной температуры, измерить разность уровней жидкости в коленах жидкостного манометра  $h_2$ .
5. По барометру измерить атмосферное давление  $p_0$ .
6. Данные занести в табл. 2.1.
7. Опыт (пункты 1–4) повторить не менее трех раз.

Таблица 2.1

### Результаты измерений

№№ п/п	$h_1$ , мм вод. ст.	$h_2$ , мм вод. ст.	$h_1 - h_2$ мм вод. ст.	$\gamma$	$\langle \gamma \rangle$
1					
2					
3					

### Вычисления

1. Вычислить по формуле (2.5) значение  $\gamma$  для каждого измерения.
2. Абсолютную погрешность для  $\Delta\gamma$  определить по правилам оценки случайных погрешностей прямых измерений  $\alpha = 0,9$ .
3. Вычислить работу адиабатического расширения для одного из измерений по формуле (2.6).

**Примечание.** При вычислении работы выразить атмосферное давление  $p_0$  и избыточное давление  $h$  в Па.

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133 \text{ Па}$$
$$1 \text{ мм вод. ст.} = 9,81 \text{ ПА}$$

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Какой процесс называется адиабатическим? Как записывается уравнение этого процесса? Как и почему меняется температура газа при адиабатическом процессе?

2. Какая теплоёмкость называется удельной, молярной? Что такое  $C_p$  и  $C_v$ ? Что больше и почему?

3. Что называется степенями свободы? Чему равно число степеней свободы у одноатомного, двухатомного и многоатомного давления?

4. Какие процессы имеют место в данной лабораторной работе? Как в каждом состоянии определяется давление?