

Лабораторная работа № 14
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ
УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗОВ c_p/c_v
МЕТОДОМ КЛЕМАНА И ДЕЗОРМА

Цель работы: опытным путем определить величину отношения удельных теплоемкостей c_p/c_v для воздуха.

Принадлежности: сосуд с манометром, ручной насос.

Основные понятия и определения

Величина отношения теплоемкости при постоянном давлении (c_p) к теплоемкости при постоянном объеме (c_v) для газов имеет важное значение при адиабатических процессах и при процессах, близких к ним. Для примера укажем, что ею, в частности, определяется скорость распространения звука в газах, от нее зависит течение газов по трубам со звуковыми скоростями и достижение сверхзвуковых скоростей в расширяющихся трубах.

Описываемый ниже способ определения отношения удельных теплоемкостей газов $\gamma = c_p / c_v$ чрезвычайно прост. Пусть мы имеем стеклянный сосуд, соединенный с манометром. Посредством крана сосуд может соединяться с атмосферой и пусть первоначально в нем было атмосферное давление. Если с помощью насоса накачать в сосуд небольшое количество воздуха и закрыть кран, то давление в сосуде, конечно, повысится; но если это повышение произошло достаточно быстро, манометрический столбик не сразу займет окончательное положение, так как сжатие воздуха было адиабатическим и, следовательно, температура его повысилась. (В действительности же нагнетание воздуха занимает некоторое время, и поэтому процесс этот нельзя считать строго адиабатическим). Окончательная разность уровней в манометре (h_1) установится только тогда, когда температура воздуха внутри сосуда сравняется благодаря теплопроводности стенок с температурой окружающего воздуха.

Обозначим через T_1 абсолютную температуру окружающего воздуха и через p_1 – давление газа внутри сосуда, соответствующее показанию манометра h_1 ; совершенно ясно, что

$$p_1 = p_0 + h_1, \quad (1)$$

где p_0 - атмосферное давление (конечно, при этом p_0 и h_1 должны быть выражены в одинаковых единицах). Эти два параметра (T_1 и p_1) характеризуют состояние газа, которое назовем первым состоянием газа (состояние I: T_1, p_1).

Если теперь быстро открыть кран, то воздух в сосуде будет расширяться адиабатически, пока давление его не сделается равным p_0 ; при этом он охладится до температуры T_2 ; это будет вторым состоянием газа (состояние II: T_2, p_0).

Если сразу после открывания снова закрыть кран, то давление внутри сосуда начнет возрастать вследствие того, что охладившийся при расширении воздух в сосуде станет снова нагреваться. Возрастание давления прекратится, когда температура воздуха в сосуде сравняется с внешней температурой T_1 ; это будет третьим состоянием газа (состояние III: T_1, p_2).

Обозначим давление воздуха в сосуде в этот момент через p_2 и соответствующее показание манометра, через h_2 . Ясно, что

$$p_2 = p_0 + h_2. \quad (2)$$

Так как переход от состояния II к состоянию III произошел без изменения объема и массы, то мы вправе применять здесь закон Шарля:

$$\frac{p_2}{T_1} = \frac{p_0}{T_2}. \quad (3)$$

К процессу адиабатического расширения, т.е. к переходу из состояния II в состояние I, может быть применен закон Пуассона, который удобно написать в следующей форме:

$$\frac{p_1^{2-1}}{T_1^2} = \frac{p_0^{2-1}}{T_2^2}, \quad (4)$$

где γ – отношение удельных теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме: c_p / c_v .

Эта формула уравнения Пуассона может быть легко получена из обычной

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma,$$

если воспользоваться для этой цели уравнением состояния газа

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Для этого последнее уравнение возведем в степень γ :

$$\frac{p_1^\gamma V_1^\gamma}{T_1^\gamma} = \frac{p_2^\gamma V_2^\gamma}{T_2^\gamma}$$

и, разделив его почленно на уравнение Пуассона,

$$\frac{p_1^\gamma V_1^\gamma}{T_1^\gamma p_1 V_1^\gamma} = \frac{p_2^\gamma V_2^\gamma}{T_2^\gamma p_2 V_2^\gamma},$$

получим

$$\frac{p_1^{\gamma-1}}{T_1^\gamma} = \frac{p_2^{\gamma-1}}{T_2^\gamma}.$$

Подставляя в уравнение (4) значение из уравнения (1) и переставляя члены, получим

$$\left(\frac{p_0 + h_1}{p_0} \right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^\gamma$$

или

$$\left(1 + \frac{h_1}{p_0} \right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{T_1 - T_2}{T_2} \right)^\gamma.$$

Так как h_1/p_0 и $(T_1 - T_2)/T_2$ – величины малые по сравнению с единицей, то, разлагая оба двучлена по биному Ньютона и ограничиваясь членами первого порядка малости, получим

$$1 + (\gamma - 1) \frac{h_1}{p_0} = 1 + \gamma \frac{T_1 - T_2}{T_2},$$

откуда

$$p_0 \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} h_1. \quad (5)$$

Но выражение, стоящее в левой части уравнения, есть не что иное, как h_2 . Действительно, подставив в уравнение (3) значение p_2 из уравнения (2), имеем:

$$\frac{p_0 + h_2}{T_1} = \frac{p_0}{T_2}, \text{ откуда следует, что } p_0 T_2 + h_2 T_2 = p_0 T_1 \text{ и } h_2 = \frac{p_0 (T_1 - T_2)}{T_2}.$$

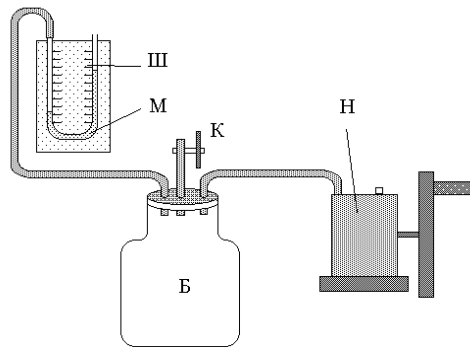
Следовательно, с учетом уравнения (5) можно записать:

$$h_2 = \frac{\gamma - 1}{\gamma} h_1.$$

Окончательно находим: $\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (6)$

Описание прибора

Прибор состоит из стеклянного баллона Б и соединенного с ним водяного манометра М и ручного насоса Н. Баллон и манометр могут через кран К соединяться с атмосферой. На панели манометра прикреплен шкала Ш, по которой отсчитывается разность давлений в баллоне и атмосферного давления.



Измерения

Перекрыв кран К с помощью насоса осторожно нагнетают воздух в сосуд. Когда разность уровней воды в манометре достигнет 40-35 см, прекращают вращать ручку насоса. Подождав немного, пока давление установится, производят первый отсчет разности уровней в манометре h_1 .

Затем, открыв кран, соединяющий баллон с атмосферой, услышите характерное шипение за счет выравнивания давления в баллоне с атмосферным. Как только прекратится шипение необходимо перекрыть кран. (Процесс перекрытия крана можно также контролировать по манометру: как только высоты уровней в манометре выровняются, кран перекрывают). Выждав некоторое время, когда уже не наблюдается поднятия уровней в манометре, записывают значение h_2 .

№	h_1 , мм	h_2 , мм	γ	$\Delta\gamma$	ε , %
1.					
...					
10.					
Ср.					

Опыт повторяют 10 раз. Результаты записывают в таблицу. Для γ укажите доверительный интервал и доверительную вероятность.

Контрольные вопросы

1. Что такое теплоемкость газа? Какова размерность этой физической величины?
2. Какова связь между c_p , c_v , и числом степеней свободы молекул газа i ?
3. Сколько степеней свободы у молекул газов He, H₂, CO₂? Какие это степени свободы?
4. В каком газе $\gamma = c_p / c_v$ имеет наибольшее значение – в H₂, He, CH₄?
5. Почему в данном эксперименте целесообразно использовать сосуд возможно большего диаметра?
6. Какие явления нарушают адиабатичность расширения газа?
7. Как повлияет на ход эксперимента наличие паров воды в воздухе?

Литература

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. – М.: Высшая школа, 1981.
2. Королев Б.И. Основы вакуумной техники. – М.: Энергия, 1957.