

Занятие 8. Первое начало термодинамики

Работа № 12. Определение отношения теплоёмкостей воздуха

ЦЕЛЬ: изучить процессы, протекающие в газе при определении отношения теплоёмкостей методом Клемана–Дезорма, и измерить отношение C_p/C_v для воздуха.

ОБОРУДОВАНИЕ: установка, состоящая из стеклянного баллона, манометра, компрессора, секундомер.

Приращение внутренней энергии идеального газа при изменении его температуры на dT

$$dU = 0,5i\nu R dT. \quad (1)$$

Число степеней свободы i молекулы – это число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве: $i=3$ для одноатомной, $i=5$ для двухатомной, $i=6$ для трёх- и многоатомной; m/M – количество вещества (число молей).

Молярная теплоёмкость C – величина, равная количеству тепла, которое нужно сообщить молю вещества, чтобы увеличить его температуру на один кельвин:

$$C = \frac{dQ}{\nu dT}.$$

Если газ нагревать при постоянном объёме, то подводимое тепло расходуется только на увеличение его внутренней энергии $dQ_v=dU$, и поэтому теплоёмкость газа при постоянном объёме

$$C_V = 0,5Ri. \quad (2)$$

При нагревании газа в условиях свободного расширения при постоянном давлении $P=\text{const}$ подводимое тепло расходуется как на приращение внутренней энергии, так и на совершение работы. Работа расширения одного моля газа в этих условиях при нагревании его на 1 К равна R . Таким образом, теплоёмкость газа при постоянном давлении определяется соотношением

$$C_p = C_V + R = \frac{i+2}{2} \cdot R. \quad (3)$$

Отношение теплоёмкостей

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (4)$$

Адиабатическим называют процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой: $dQ=0$. Из первого начала термодинамики для адиабатического процесса

$$\frac{m}{M} \frac{i}{2} R dT = -PdV$$

следует, что адиабатическое расширение ($dV>0$) сопровождается охлаждением ($dT<0$) газа, а сжатие ($dV<0$) – его нагреванием ($dT>0$).

Уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона)

$$PV^\gamma = \text{const.} \quad (5)$$

Уравнение изотермического процесса

$$PV = \text{const.} \quad (6)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения выполняют на установке (рис. 1), состоящей из большого стеклянного баллона Б, насоса Н и водяного манометра 1. Баллон соединяют краном К с насосом, а краном K_0 – с атмосферой.

Метод, предложенный Клеманом и Дезормом (1819 г.), основан на изучении параметров некоторой массы газа, переходящей из одного состояния в другое двумя последовательными процессами: адиабатическим и изохорическим.

Эти процессы на диаграмме $P-V$ (рис. 1) представлены кривыми 1–2 и 2–3 соответственно. Если накачать воздух в баллон и выдержать до установления теплового равновесия с окружающей средой, то в этом начальном состоянии 1 газ имеет параметры P_1, V_1, T_1 , причём температура газа в баллоне равна температуре окружающей среды, а давление $P_1 = P_0 + P'$ немного больше атмосферного P_0 .

При открывании крана K_0 воздух в баллоне перейдёт в состояние 2. Его давление снизится до атмосферного $P_2 = P_0$. Оставшаяся масса воздуха, которая занимала в состоянии 1 часть объёма баллона, расширяясь, займёт весь объём V_2 . При этом температура воздуха, оставшегося в баллоне, уменьшится. При быстром расширении газа можно пренебречь его теплообменом с окружающей средой через стенки баллона и считать процесс 1–2 адиабатическим:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = P_0 V_2^\gamma \quad (7)$$

После закрытия крана K_0 охлаждённый адиабатическим расширением воздух в баллоне будет нагреваться (процесс 2–3) до температуры окружающей среды $T_3 = T_1$ при постоянном объёме $V_2 = V_3$. При этом давление в баллоне возрастёт до $P_3 = P_2 + P''$.

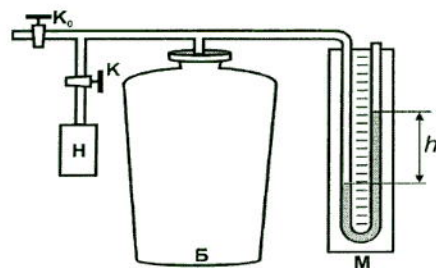


Рис. 1

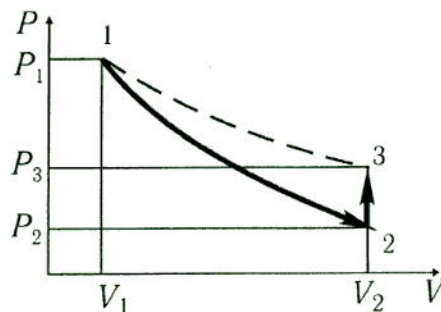


Рис. 2

Избыточное давление воздуха P' и P'' измеряют с помощью U-образного манометра по разности уровней жидкости с плотностью ρ :

$$P' = \rho g H; \quad P'' = \rho g h, \quad (8)$$

где H и h – показания манометра в состояниях 1 и 3 соответственно.

Тогда

$$P_1 = P_0 + \rho g H, \quad P_3 = P_0 + \rho g h.$$

Состояния воздуха 1 и 3 принадлежат изотерме, поэтому

$$P_1 V_1 = P_3 V_3. \quad (9)$$

Исключив отношение объёмов из уравнений (7) и (9), найдём связь давлений газа:

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^\gamma = \left(\frac{P_1 / P_0}{P_3 / P_0} \right)^\gamma.$$

Выразим давления P_1 и P_2 через P_0 с учётом (8.8) и прологарифмируем:

$$\ln \left(1 + \frac{\rho g h}{P_0} \right) = \gamma \left(n \left(1 + \frac{\rho g h}{P_0} \right) - \ln \left(1 + \frac{\rho g h}{P_0} \right) \right).$$

С учётом того, что если $x \ll 1$, то $\ln(1+x) \approx x$, получим расчётную формулу в следующем виде:

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \quad (10)$$

Таким образом, для определения отношения теплоёмкостей воздуха достаточно осуществить процессы (1–2–3) и измерить показания манометра H и h в состояниях газа 1 и 3 соответственно.

Но осуществить равновесный адиабатический процесс сложно: если проводить расширение газа быстро, то процесс не будет равновесным, так как температура и давление газа не успевают выравняться по объёму. Для проведения медленного адиабатического процесса нужна тепловая изоляция баллона. В данной установке за время t расширения газа подводится тепло. Поэтому при последующем изохорическом нагревании давление поднимается меньше, т.е. измеряемое $h' < h$, необходимого для расчёта γ . По мере увеличения времени расширения газа значение h' снижается, приближаясь к нулю при $t \rightarrow \infty$ (изотермическое расширение 1–3). Опытным путём установлено, что

$$h' = h e^{-at}.$$

Логарифмируя эту функцию, получаем зависимость

$$\ln h' = \ln h - at, \quad (11)$$

где a – постоянная установки,

t – время протекания процесса, в течение которого баллон сообщается с атмосферой.

График зависимости (11) конечного избыточного давления воздуха в баллоне от времени контакта его с атмосферой показан на рис. 3.

Построив по данным эксперимента такой график, можно путём экстраполяции опытной прямой до $t=0$ определить значение $\ln h$, а по нему значение h , необходимое для расчёта γ по формуле (10).

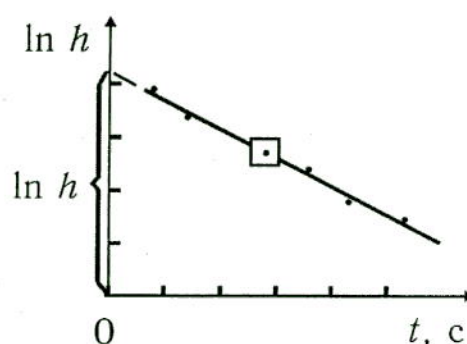


Рис. 3

Задание 1. Изучение изопроецессов в газе

Прежде чем приступить к измерениям, изучите газовые процессы, необходимые для определения отношения теплоёмкостей γ , и дайте их описание в табл. 1.

1. Закройте кран K_0 , откройте кран K , включите компрессор и накачайте воздух в баллон до избыточного давления 230...250 мм рт.ст.

2. При закрытых кранах K_0 и K выждите 2–3 мин, пока установится постоянное давление в баллоне (отсчёт H), это состояние воздуха 1 (см. график рис.2).

Таблица 1

Процесс	Название процесса	Направление процесса (сжатие или расширение, нагревание, охлаждение)	Соотношения параметров воздуха в баллоне P_i, T_i и в лаборатории P_l, T_l			
			начальные		конечные	
1–2			$P_1 > P_l$	$T_1 = T_l$	P_2, P_l	T_2, T_l
2–3			P_2, P_l	T_2, T_l	P_3, P_l	T_3, T

3. Открыв кран K_0 , соедините баллон с атмосферой и после выравнивания давлений закройте кран K_0 , состояние газа в этот момент обозначено 2.

4. Выждите 2–3 мин до достижения состояния 3, при котором установится постоянное давление в баллоне (отсчёт h').

З а д а н и е 2. Определение отношения теплоёмкостей γ

1. Создайте в баллоне постоянное избыточное давление H , как описано в задании 1, п. 1.2.

2. Открывая кран K_0 , соедините баллон с атмосферой и одновременно включите секундомер. Оставьте кран K_0 открытым в течение $t = 5$ с и затем быстро закройте его.

3. Выждите 2–3 мин, пока в баллоне установится постоянное давление, и сделайте отсчёт по манометру h' .

4. Проведите аналогичные измерения с различным временем сообщения баллона с атмосферой ($t = 10, 15, 20$ и 25 с), но при одинаковом начальном значении H . Для его получения воздух накачайте медленно, приближаясь к нужной величине со стороны меньших значений давления. Результаты всех измерений H и h записывайте в табл. 2.

Таблица 2

$H =$ мм	t , с	5	10	15	20	25	0	Координаты средней точки	
	h' , мм						$h =$		$\bar{t} =$
	$\ln h'$						$\ln h =$		$\overline{\ln h'} =$

5. Найдите значения $\ln h'$ и нанесите опытные точки на поле графика в координатах $\ln h' - t$. Обязательно воспользуйтесь рекомендациями на с.11–13.

6. Продолжая прямую до пересечения с осью ординат ($t=0$), определите величину $\ln h$ (см. рис. 3).

7. По найденному значению $\ln h$ определите h и рассчитайте величину γ по формуле (8.10).

8. Вычислите по формуле (4) теоретическое значение величины отношения теплоёмкостей γ , считая, что воздух состоит, в основном, из двухатомных молекул.

9. Сравните экспериментальное значение γ с теоретическим (формула (4)) и сделайте вывод по работе.

Контрольные вопросы

1. Что называют: а) теплоёмкостью тела; б) удельной теплоёмкостью газа; в) молярной теплоёмкостью газа? В каких единицах их измеряют?
2. От чего зависят эти теплоёмкости?
3. Каковы величины молярных теплоёмкостей C_p и C_V для воздуха? Чем объясняется, что $C_p > C_V$?
4. Для каких теплоёмкостей справедливы соотношения $C_p = \frac{i+2}{2} R$,
 $C_p = C_V + R$?
5. Что называют числом степеней свободы молекулы?
6. Каковы значения показателя адиабаты γ : а) для двухатомного; б) для трехатомного и многоатомного идеального газа?
7. Для какого газа: одноатомного или двухатомного – график адиабаты более крутой?
8. Запишите первое начало термодинамики для адиабатического процесса.
9. Какие процессы описываются уравнениями: $PV = \text{const}$; $PV^\gamma = \text{const}$?
10. Как изменяется температура и давление газа: а) при адиабатическом расширении; б) при адиабатическом сжатии?
11. В каких состояниях из указанных на диаграмме (рис. 2, с. 89) воздух в баллоне: а) имеет комнатную температуру; б) находится при атмосферном давлении?
12. Какой процесс совершается при открывании крана K_2 , если в баллоне было избыточное давление воздуха?
13. Какой процесс происходит после адиабатического расширения газа при проведении опыта?
14. Какие величины измеряют в работе для расчёта показателя адиабаты γ ?
15. По какой формуле определяют значение отношения теплоёмкостей γ : а) опытное; б) теоретическое?