

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: изучение процессов идеального газа и определение на основании свойств этих процессов отношения теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме для воздуха.

Задание: выполнить заданные процессы над воздухом, рассчитать отношение теплоемкостей и погрешность измерений.

Подготовка к выполнению лабораторной работы: изучить понятия теплоемкостей, свойства процессов идеального газа, а также первое начало термодинамики. Ознакомиться с установкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев, *Курс общей физики, т. 1: Механика, молекулярная физика*, М.: Наука, 1987, §§83, 86–89, 97
2. Г. А. Зисман, О. М. Тодес, *Курс общей физики*, М.: Наука, 1969, т. 1, §§31–34

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется теплоемкостью газа, удельной теплоемкостью, мольной теплоемкостью? Написать размерности этих величин в системе СИ.
2. Сформулировать первое начало термодинамики.
3. Что такое внутренняя энергия газа?
4. Почему c_p всегда больше c_v ? Чему равна их разность для идеального газа?
5. Чему равно число степеней свободы одно-, двух- и трехатомного газов?
6. Как происходит распределение энергии по степеням свободы в классической статистике?
7. Каким образом c_p , c_v и γ зависят от числа степеней свободы молекул идеального газа?
8. Какой процесс называется политропическим?

Typeset by $\mathcal{A}\mathcal{M}\mathcal{S}$ - $\text{\textsf{TEX}}$

9. Написать уравнение Пуассона. Какой процесс описывает это уравнение?
10. Как изменяются внутренняя энергия и температура газа при адиабатическом расширении?
11. Описать установку, с помощью которой в работе определяется величина γ для воздуха.
12. Описать последовательность процессов идеального газа, которые происходят в процессе выполнения работы.
13. Какое влияние на результаты опыта может оказать наличие водяного пара в сосуде?

ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ И МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ

Теплоемкостью C какого-либо тела в каком-либо процессе называется величина, равная отношению количеству тепла δQ , полученного телом, к изменению его температуры dT

$$C = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (1)$$

Теплоемкость единицы массы вещества называется удельной теплоемкостью, теплоемкость одного моля вещества — молярной теплоемкостью.

Количество теплоты, поглощенной телом при изменении его состояния, зависит не только от начального и конечного состояний, но и от способа, которым был осуществлен переход между ними. Поэтому теплоемкость зависит от способа нагревания тела. Обычно различают теплоемкость при постоянном давлении (c_p) и при постоянном объеме (c_V), если в процессе нагревания поддерживается постоянными соответственно давление или объем.

Согласно первому началу термодинамики, в случае нагревания при постоянном давлении часть теплоты идет на совершение работы при расширении газа, а часть — на увеличение его внутренней энергии, тогда как в случае нагревания при постоянном объеме вся теплота расходуется на увеличение внутренней энергии. В связи с этим c_p всегда больше, чем c_V .

Для идеального газа разность молярных теплоемкостей равна

$$c_p - c_V = R, \quad (2)$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Теоретическое вычисление теплоемкостей идеальных газов методами классической статистики сводится к вычислению средней энергии теплового движения отдельных молекул. Это движение складывается из поступательного и вращательного движений молекулы как целого и из колебаний атомов внутри молекулы. Закон равнораспределения энергии молекул

по степеням свободы приводит к следующему выражению для молярной теплоемкости c_V идеального газа

$$c_V = \frac{i}{2} R. \quad (3)$$

Здесь $i = n_{\text{п}} + n_{\text{в}} + 2n_{\text{к}}$, где $n_{\text{п}}$, $n_{\text{в}}$, $n_{\text{к}}$ — соответственно числа поступательных, вращательных и колебательных степеней свободы молекул газа. Таким образом, отношение теплоемкостей c_p и c_V для идеального газа в силу (2) и (3) представляется в виде

$$\gamma = \frac{c_p}{c_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (4)$$

Отношение теплоемкостей γ входит в уравнения, описывающие адиабатические процессы идеальных газов. Такие процессы широко применяются на практике, например, в различного рода тепловых двигателях. Развитие экспериментальных методов определения γ для различных газов, наряду с практическим значением, сыграло большую роль в установлении пределов применимости положений классической статистики.

Определение отношения c_p/c_V для воздуха осуществляется в настоящей работе методом адиабатического расширения. Соответствующая экспериментальная установка схематически изображена на рис. 1.

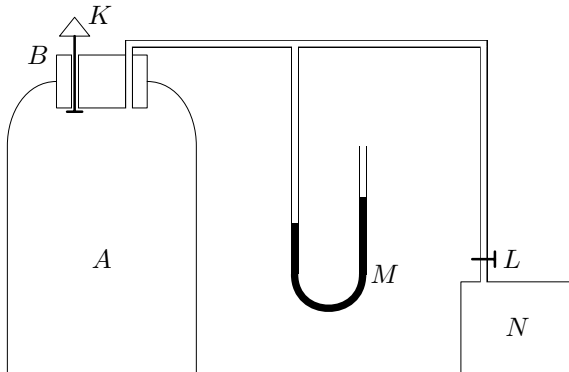


Рис. 1. Схема установки

Стеклянный сосуд A закрыт пробкой B . Он сообщается через металлические и резиновые трубки с манометром M , насосом N и атмосферой

(через встроенный в пробку клапан K). С помощью насоса воздух нагнетается в сосуд. Краном насос отключается от сосуда. Избыточное давление в сосуде измеряется водяным манометром. Открывая клапан K , можно выпускать часть воздуха из сосуда, тем самым уменьшая давление в нем вплоть до атмосферного.

Рассматривая процессы, происходящие в сосуде с воздухом, можно определить величину γ . Эти процессы, а также начальные и конечные состояния газа в сосуде для каждого из них условно изображены на рис. 2.

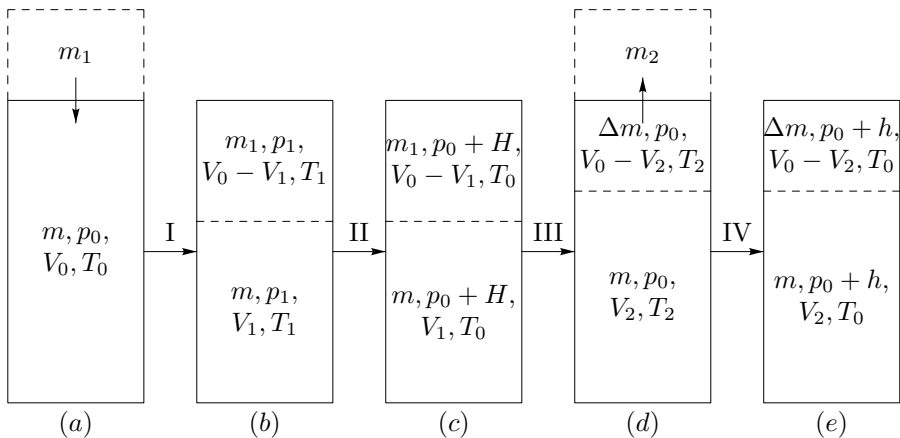


Рис. 2

Пусть в исходном состоянии (a) масса воздуха m находится в сосуде объемом V_0 . Давление газа равно атмосферному давлению p_0 , а температура — комнатной температуре T_0 . На диаграмме (рис. 3), описывающей изменение состояния массы газа m , исходное состояние обозначено точкой a .

С помощью насоса нагнетаем в сосуд некоторую массу газа m_1 . При этом давление и температура в сосуде возрастают. Процесс I изменения состояния массы газа m в сосуде является политропическим (см. [1], §89). Перекрываем кран L . В этот момент давление и температура в сосуде соответственно равны p_1 и T_1 , масса газа m занимает уже не весь объем V_0 , а его часть $V_1 < V_0$ (точка b на рис. 3).

С течением времени происходит изохорический процесс II. Воздух в сосуде охлаждается до комнатной температуры T_0 , а давление понижается, но превышает атмосферное давление на величину H (далее p_0 и H измеря-

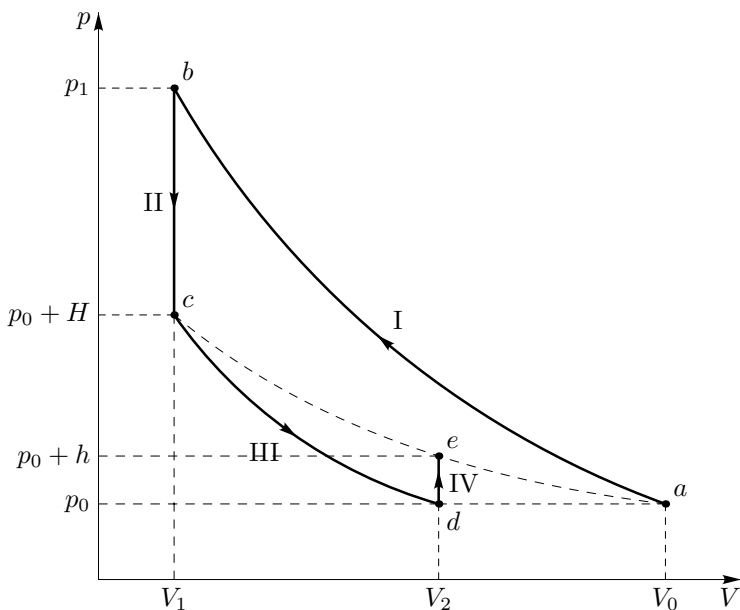


Рис. 3

ют в одних и тех же единицах — мм водяного столба). Соответствующее состояние (c) воздуха, взятого в количестве m , характеризуется параметрами $p_0 + H$, V_1 , T_0 . На диаграмме (рис. 3) оно обозначено точкой c .

Для адиабатического расширения воздуха (III) быстро откроем клапан K , и, как только давление впервые сравняется с атмосферным, закроем его. К концу адиабатического процесса (на рис. 3 участок адиабаты изображен кривой III) температура воздуха в сосуде уменьшается до T_2 ; масса воздуха m занимает объем $V_2 < V_0$, масса воздуха в сосуде превышает первоначальное его количество на некоторую величину δm . Это состояние массы газа m (точка d на рис. 3) имеет параметры p_0 , V_2 , T_2 .

После закрытия клапана K в течение некоторого времени происходит изохорический процесс IV. Воздух в сосуде нагревается от T_2 до комнатной температуры T_0 , давление растет от p_0 до $p_0 + h$. В конце процесса (точка e на рис. 3) масса воздуха m в сосуде обладает параметрами $p_0 + h$, V_2 , T_0 .

Отметим, что состояния (a), (e) и (c) лежат на изотерме, отвечающей температуре T_0 (пунктирная кривая V на рис. 3).

Состояния (с) и (d) связаны соотношением

$$\frac{p_0 + H}{p_0} = \left(\frac{T_2}{T_0} \right)^{\gamma/(1-\gamma)}, \quad (5)$$

вытекающим из уравнения Пуассона.

Переход из состояния (d) в состояние (e) происходит изохорически, поэтому

$$\frac{p_0}{p_0 + h} = \frac{T_2}{T_0}. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) получаем

$$1 + H/p_0 = (1 + h/p_0)^{\gamma/(\gamma-1)}. \quad (7)$$

В условиях опыта избыточное давление h мало по сравнению с атмосферным давлением p_0 . Поэтому

$$(1 + h/p_0)^{\gamma/(\gamma-1)} = 1 + \frac{\gamma h}{(\gamma-1)p_0} + \dots \quad (8)$$

Заменим правую часть уравнения (7) согласно (8), и разрешив полученное уравнение относительно γ , найдем

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \quad (9)$$

Формула (9) является расчетной при определении γ . Методика определения γ состоит в многократном вычислении его значения для каждой пары измеренных значений H и h .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с установкой.
2. Закрыть клапан K , и, открыв кран L , произвести нагнетание воздуха в сосуд. Закрыть кран L . В этот момент газ в сосуде находится в состоянии b (рис. 3).
3. Выждать 2–3 минуты, следя за уровнями воды в манометре. Когда изменения уровней прекратятся, то есть будет достигнуто состояние c (рис. 3), записать в таблицу положения уровней манометра (отсчеты H). При отсчетах глаз наблюдателя должен находиться в горизонтальной плоскости, касательной к поверхности мениска.

4. Быстро открыть клапан K , и, как только впервые выровняются уровни столбов жидкости в коленях манометра, быстро его закрыть. В этот момент газ находится в состоянии d (рис. 3).
5. Выждать 2–3 минуты, следя за уровнями воды в манометре. Когда перемещение менисков прекратится, то есть будет достигнуто состояние e (рис. 3), произвести отсчеты h и занести их в таблицу.
6. Повторить опыты пунктов 2–5 десять раз.

Результаты должны быть оформлены в виде таблицы (см. таблицу 1).

ТАБЛИЦА 1

	отсчет H по шкале маном.		H	отсчет h по шкале маном.		h	γ	$\Delta\gamma$	$(\Delta\gamma)^2$
	левый	правый		левый	правый				
1									
2									
...									
10									

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. В каждом опыте определить величины H и h . Соответствующая величина определяется как расстояние между менисками в коленях манометра, выраженное в миллиметрах.
2. Для каждого из опытов по формуле (9) вычислить γ и занести полученное значение в таблицу. Определить среднее арифметическое

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i. \quad (10)$$

3. Вычислить среднеквадратичное отклонение

$$\Delta\gamma_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \gamma_{\text{ср}})^2}{n(n-1)}}. \quad (11)$$

Результат работы представить в виде $\gamma = \gamma_{\text{ср}} \pm \Delta\gamma_{\text{кв}}$.

4. По формуле (4) определить теоретическое значение γ , считая молекулы воздуха двухатомными с жесткой связью. Сравнить теоретическое и экспериментальное значения γ . Привести свои соображения о причинах несоответствия этих значений.