

Лабораторная работа 1.65
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ
ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА МЕТОДОМ
АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

М.М. Зверев

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, первое начало термодинамики. Ознакомиться с установкой.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1987, т.1, гл. X, §§ 83, 86 - 89, гл. XI, § 97.
2. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики, М.: Наука, 1969, т.1, гл. VIII, § 31 -34.

Контрольные вопросы

1. Что называется теплоемкостью тела, удельной теплоемкостью, молярной теплоемкостью? Написать размерности этих величин в системе СИ.
2. Сформулировать первое начало термодинамики.
3. Что такое внутренняя энергия тела ?
4. Почему C_p всегда больше C_v ? Чему равна их разность ?
5. Что называется степенями свободы молекулы идеального газа?
6. Чему равно число степеней свободы одно-, двух-, трех-атомного газа ?
7. Как происходит распределение энергии по степеням свободы в классической статистике ?
8. Каким образом C_p , C_v и γ зависят от числа степеней свободы молекул идеального газа ?
9. Что называется политропическим процессом ?

10. Написать уравнение Пуассона. Какой процесс описывает это уравнение ?
11. Как изменяется внутренняя энергия и температура газа при адиабатическом расширении ?
12. Описать установку, с помощью которой в работе определяется величина γ для воздуха.
13. Описать последовательность процессов идеального газа, которые происходят во время выполнения работы.

Описание аппаратуры и метода измерений

Теплоемкостью $C(T)$ какого-либо тела называется величина, равная отношению количеству тепла dQ , полученного телом и вызвавшего повышение его температуры на dT , к величине dT , то есть $C(T) = dQ/dT$.

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

$$C_p - C_v = R \quad (1)$$

где R - универсальная газовая постоянная.

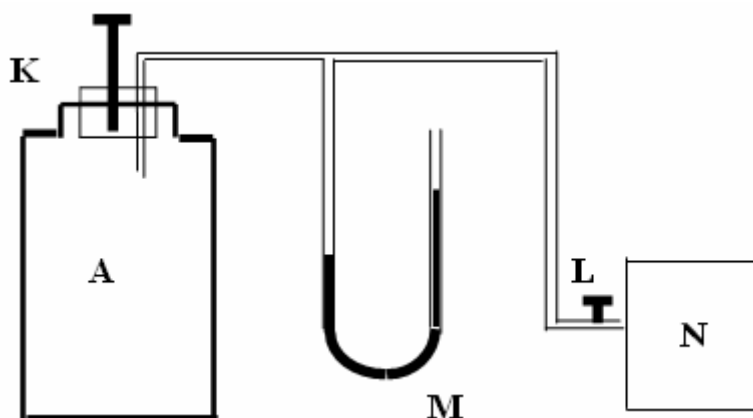


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

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

$$C_v = iR/2 \quad (2)$$

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 (1) представляется в виде

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} \quad (3)$$

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. Схема

экспериментальной установки изображена на рис. 1.

Стеклянный сосуд А сообщается через металлические и резиновые трубки с манометром М, микрокомпрессором N и атмосферой (через клапан К). С помощью компрессора N воздух нагнетается в сосуд. Краном L компрессор отключается от сосуда.

Избыточное давление в сосуде измеряется водяным манометром. Открывая клапан К, можно выпускать часть воздуха из сосуда, тем самым уменьшая давление в нем вплоть до атмосферного.

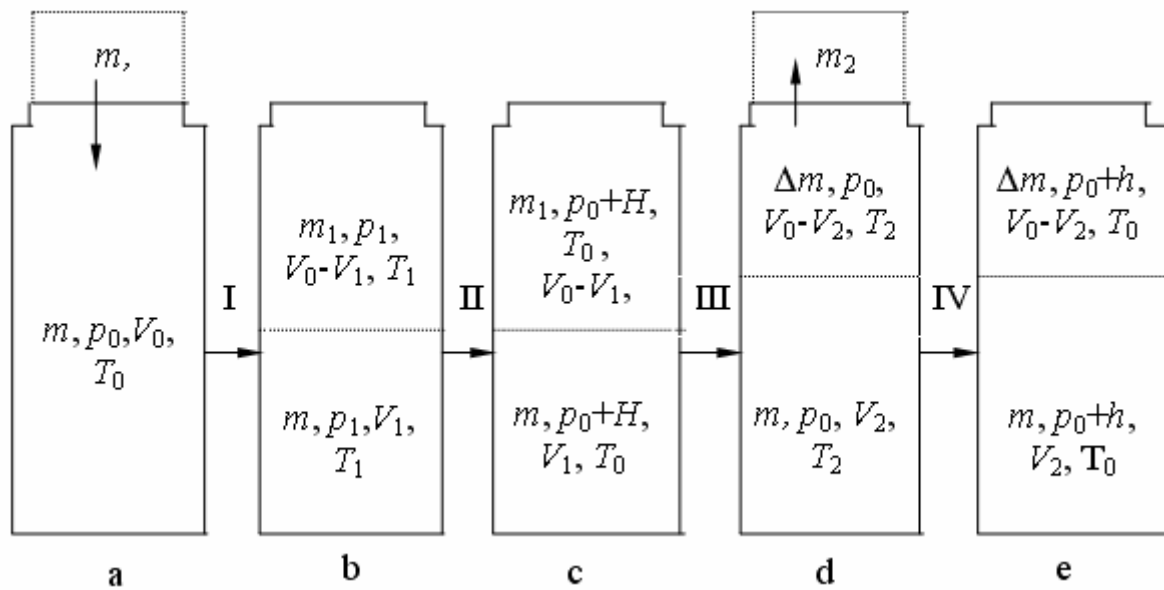


Рис. 2. Процессы, происходящие в сосуде с воздухом. Начальные и конечные состояния газа обозначены буквами (а - е)

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.

Пусть в исходном состоянии (а) 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 а.

С помощью компрессора 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).

Прекращаем подачу воздуха (выключаем компрессор). 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).

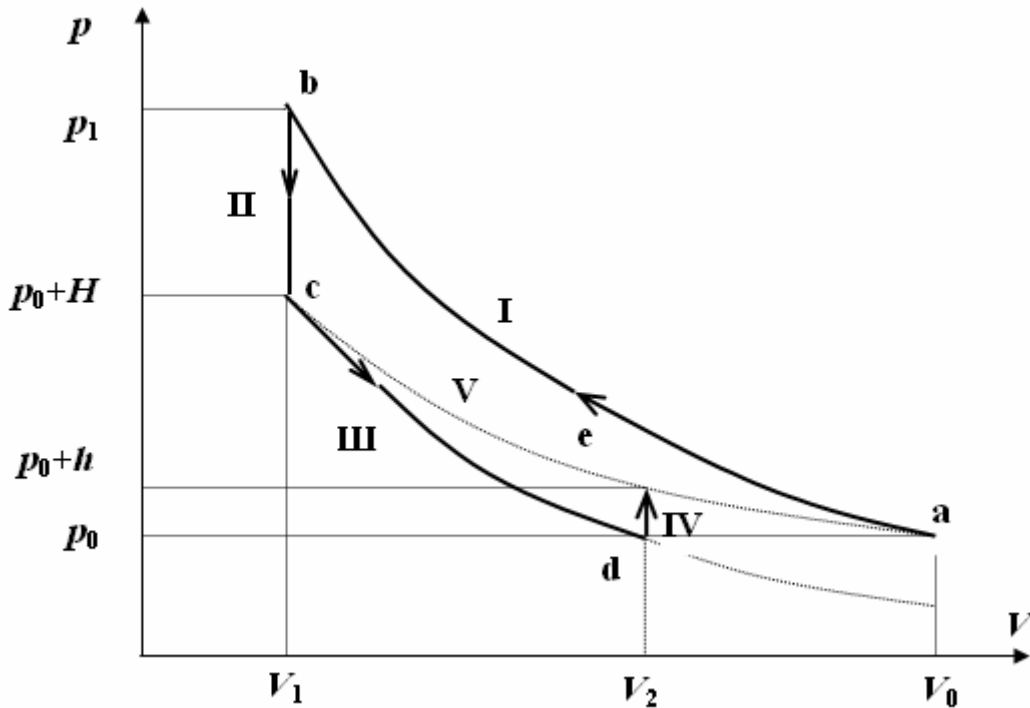


Рис. 3. Диаграмма состояний

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 измеряют 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 К, и как только давление сравняется с атмосферным, закроем его (поворачиваем до щелчка по часовой стрелки тумблер «Атмосфера»). К концу адиабатического процесса (на рис. 3 участок адибаты изображен кривой III) температура воздуха в сосуде уменьшается до T_2 ; масса воздуха m занимает объ-

ем $V_2 < V_0$, масса воздуха в сосуде превышает первоначальное его количество на некоторую величину. Это состояние массы газа m (точка **d** на рис.3) имеет параметры p_0, V_2, T_2 .

После закрытия клапана К 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 (тонкая кривая V на рис. 3).

Состояния (**c**) и (**d**) связаны соотношением

$$\frac{p_0 + H}{p_0} = \left(\frac{T_2}{T_0} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}, \quad (4)$$

вытекающим из уравнения Пуассона.

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

$$\frac{p_0}{p_0 + h} = \frac{T_2}{T_0}. \quad (5)$$

Из уравнений (4) и (5) получаем

$$1 + \frac{H}{p_0} = \left(1 + \frac{h}{p_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (6)$$

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

$$\left(1 + \frac{h}{p_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \approx 1 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \times \frac{h}{p_0}. \quad (7)$$

Заменим правую часть уравнения (6) согласно (7), и разрешив полученное уравнение относительно γ , найдем

$$\gamma = \frac{H}{H - h} \quad (8)$$

Формула (8) является расчетной при определении γ . Методика определения γ состоит в многократном вычислении его значения для каждой пары измеренных значений H и h .

Экспериментальная установка

Для определения отношения теплоемкостей воздуха $\gamma = c_p / c_v$ используется экспериментальная установка ФПТ1-6, общий вид которой схематически показан на рис. 4.

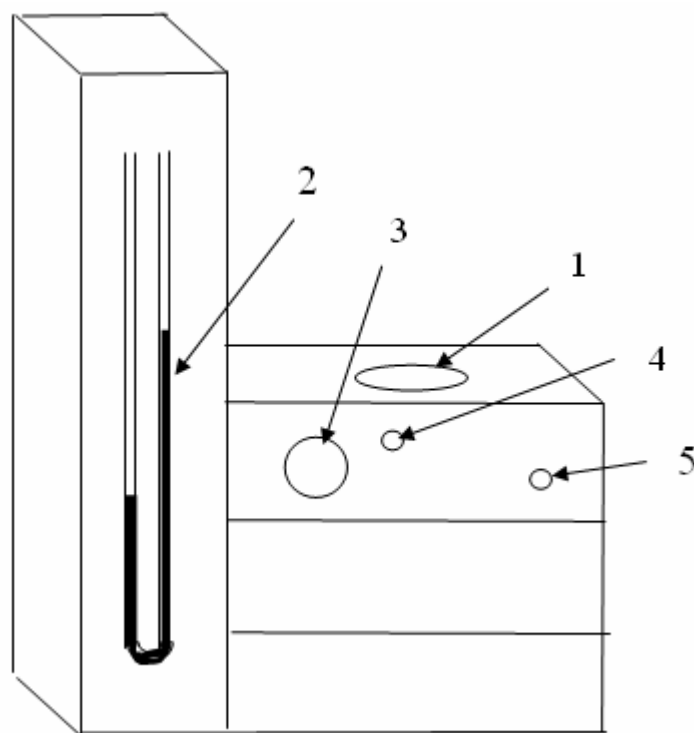


Рис. 4. Установка ФПТ1-6 для экспериментального определения отношения теплоемкостей. 1 – колба, 2 – манометр, 3 – пневмоклапан, «Атмосфера» (клапан К, рис. 1), 4 – тумблер «Воздух», 5 – тумблер «Сеть».

Установка состоит из стеклянной колбы, соединенной с открытым водяным манометром 2. Воздух нагнетается в колбу микрокомпрессором, размещенном в блоке приборов. Микрокомпрессор включается тумблером «Воздух» (4), установленным на передней панели блока приборов. Пневмотумблер «Атмосфера» (3), расположенный на панели блока приборов, позволяет при повороте его по часовой стрелке до щелчка соединить колбу с атмосферой.

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с установкой.
2. Заготовить следующую таблицу с нужным числом горизонтальных строчек.

Таблица 1

№ изм.	H , мм	h , мм	$\gamma = \frac{H}{H-h}$	$\Delta\gamma = \gamma - \gamma_{\text{ср}} $	$(\Delta\gamma)^2$
1.					
2.					
3.					
...					
...					

3. Включить установку тумблером «Сеть».
4. Для подачи воздуха в колбу на короткое время включить тумблер «Воздух», контролируя давление в колбе с помощью манометра.
5. Когда разность уровней воды в трубках манометра достигнет 150 – 250 мм, отключить подачу воздуха, для чего выключить тумблер «Воздух». В этот момент газ в сосуде находится в состоянии b (рис. 3). Если не выключить тумблер «Воздух», вода выльется из трубки манометра и установка выйдет из строя!
6. Подождать 2 – 3 минуты, следя за уровнями воды в манометре. Когда изменения уровней прекратятся (температура воздуха в колбе сравняется с температурой окружающего воздуха T_0 , то есть будет достигнуто состояние с (рис. 3)), записать в таблицу разность уровней H , установившуюся в коленях манометра. При отсчетах глаз наблюдателя должен находиться в горизонтальной плоскости, касательной к поверхности мениска.
7. На короткое время соединить колбу с атмосферой, повернув пневмотумблер «Атмосфера» по часовой стрелке до щелчка. В этот момент газ находится в состоянии d (рис. 3).
8. Выждать 2 - 3 минуты, следя за уровнями воды в манометре. Когда перемещение менисков прекратится, то есть в колбе установится постоянное давление p_1 (состояние e (рис. 3)), определить разность уровней h , установившуюся в коленях манометра,

и полученное значение занести в таблицу.

9. Повторить измерения по пп. 4 – 8 не менее 10 раз при различных значениях величины H .

10. Выключить установку тумблером «Сеть».

Обработка результатов измерений.

1. Для каждого из опытов по формуле

$$\gamma = \frac{H}{H - h}$$

вычислить γ и занести полученное значение в таблицу. Определить среднее арифметическое

$$\gamma_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad (9)$$

2. Вычислить случайную погрешность

$$\Delta\gamma = \alpha_{n,p} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \gamma_{\text{ср}})^2}, \quad (10)$$

где $\alpha_{n,p}$, называемый коэффициентом Стьюдента, зависит как от количества измерений n , так и от доверительной вероятности p .

3. Результат работы представить в виде

$$\gamma = \gamma_{\text{ср}} \pm \Delta\gamma \quad (11)$$

4. По формуле (4) определить теоретическое значение γ , считая молекулы воздуха двухатомными с жесткой связью.

5. Сравнить теоретическое и экспериментальные значения γ . Привести свои соображения о причинах несоответствия этих значений.