

Определение показателя адиабаты воздуха методом Клемана - Дезорма

Цель работы: изучение термодинамических процессов в идеальном газе и экспериментальное определение показателя адиабаты воздуха

Методика определения показателя адиабаты воздуха γ

Для определения показателя адиабаты γ с воздухом, находящимся в баллоне, проводят последовательность термодинамических процессов, представленных на диаграмме “ $p - V$ ” (рис. 1).

Воздух, находящийся в баллоне, в исходном состоянии имеет температуру T_0 , занимает объем V_0 и создает давление p_0 (точка 1 на диаграмме). Затем в баллон накачивается воздух (процесс 1–2). Газ в баллоне сжимается и нагревается. После изохорного остывания до начальной температуры (2–3) газ имеет некоторое давление p_1 и температуру T_0 . Затем с помощью крана баллон соединяют с атмосферой, и газ адиабатно расширяется (3 – 4). При этом газ охлаждается, и его давление падает до значения p_0 , а температура – до величины T_1 , причем $T_1 < T_0$. В момент достижения p_0 кран перекрывается, и газ изохорно нагревается до комнатной температуры (4 – 5). В конечном состоянии 5 давление воздуха равно p_2 , а температура T_0 .

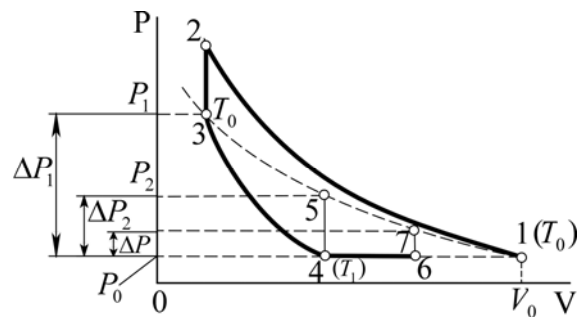


Рис. 1

В течение всех рассматриваемых термодинамических процессов масса воздуха в баллоне больше или равна исходной массе m_0 (рабочая масса). Накачиваемый и выпускаемый воздух служит лишь для сжатия и расширения рабочей массы воздуха.

Переход из состояния 3 в 4 является адиабатным, поэтому

$$p_1 T_0^{\gamma/(1-\gamma)} = p_0 T_1^{\gamma/(1-\gamma)}. \quad (1)$$

Переход из состояния 4 в 5 является изохорным, то есть

$$T_1 / p_0 = T_0 / p_2. \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) получим

$$\gamma = (\ln p_1 - \ln p_0) / (\ln p_1 - \ln p_2). \quad (3)$$

Величины p_0 , p_1 , p_2 незначительно отличаются друг от друга, поэтому отношение разностей логарифмов таких чисел с достаточно большой степенью

точности можно заменить отношением разностей самих чисел, то есть $\gamma = (p_1 - p_0)/(p_1 - p_2)$ или

$$\gamma = 1/(1 - \Delta p_2 / \Delta p_1), \quad (4)$$

где $\Delta p_1 = p_1 - p_0$, $\Delta p_2 = p_2 - p_0$.

Таким образом, для нахождения γ необходимо экспериментально определить Δp_1 и Δp_2 .

Описание установки

В стеклянный баллон 1 (рис. 2, рис. 3 и рис. 4), соединенный с компрессором 2, через напускной кран 3 накачивается воздух. Клапан сброса воздуха 4, находящийся на верхней крышке установки позволяет резко уменьшить давление в баллоне практически без теплообмена с окружающей средой. На рис. 2 представлена передняя панель установки 6, на которой размещаются тумблер “Сеть” 7, тумблер “Компрессор” 8, водяной U-манометр 5, кран 3 перепуска воздуха со следующими положениями:

ОТКРЫТ - кран на данной отметке открывает линию к компрессору 2.

ЗАКРЫТ - кран на данной отметке перекрывает баллон 1.

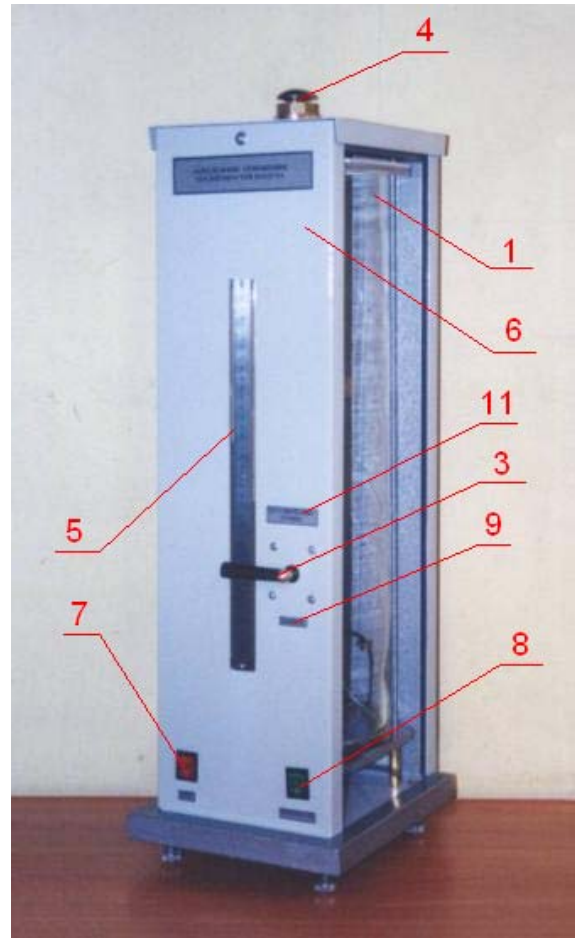


Рис. 2

РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ - кран на данной отметке (верхнее положение) соединяет баллон 1 с атмосферой и позволяет отрегулировать уровень воды в коленах U-манометра после заполнения баллона воздухом.

Перепад давления в баллоне измеряется по разности уровней в водяном U-манометре 5.

Установка работает следующим образом. В баллон компрессором 2 накачивается воздух до определенного избыточного давления (разность уровней в коленах U-манометра должна составлять $\Delta h \approx 250 \pm 50$, мм). В каждой серии опытов эта разность должна быть примерно одинаковой (регулируется краном 3). Через 2 - 3 минуты температура воздуха в баллоне приближается к температуре

окружающей среды. Затем осуществляется быстрый сброс давления через выпускное отверстие клапаном 4. При этих условиях процесс с достаточной точностью можно считать адиабатическим. После того, как клапан сброса закрылся, протекает изохорный процесс теплообмена с окружающей средой. Через 2 - 3 минуты температура воздуха в баллоне приближается к температуре окружающей среды.

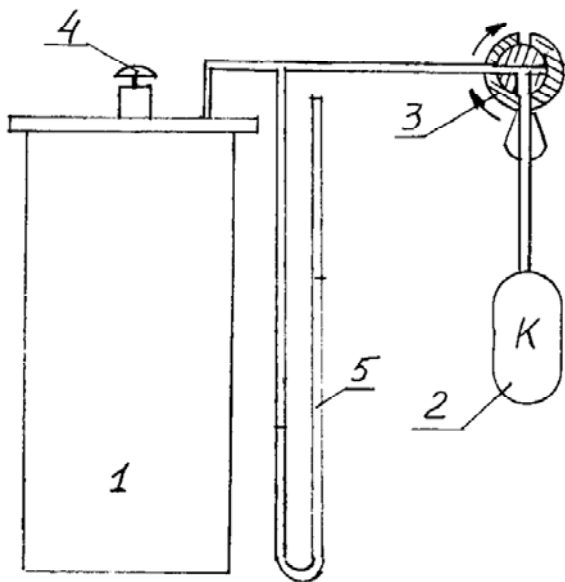


Рис. 3

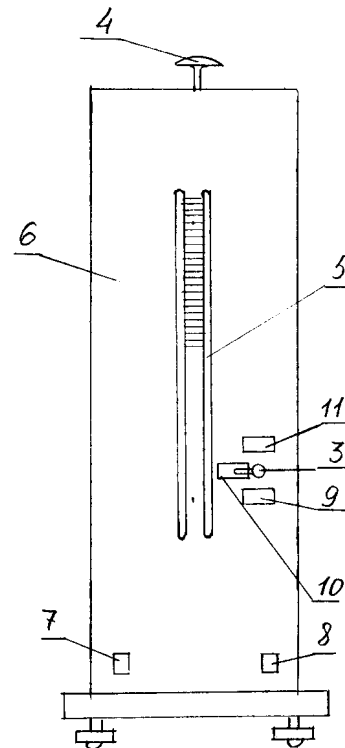


Рис. 4

Задание 1. Определение показателя адиабаты воздуха методом косвенных измерений

1. Ознакомьтесь с передней панелью установки (рис. 2). Тумблеры “Сеть” и “Компрессор” должны находиться в выключенном состоянии, кран 3 (положение 3 – “Закрыт”, рис. 4) – горизонтальное положение рукоятки влево. Включите установку (тумблер “Сеть”).

2. Рукоятку крана установите вертикально вниз (положение 9 – “Открыт”, рис. 4). Накачайте (тумблер “Компрессор”) воздух в баллон (процесс 1 – 2) так, чтобы разность уровней воды в манометре (перепад давления) достигала величины $\Delta p \approx 250 \pm 50$ мм водяного столба. **ВНИМАНИЕ:** Сразу же установите кран 3 в положение “Закрыт” – горизонтальное положение рукоятки влево, а затем выключите насос.

3. Подождите не менее 2 минут (процесс 2 – 3). Измерьте установившееся значение перепада давления Δp_1 и запишите это значение в табл. 1. В каждой серии опытов эта разность должна быть одинаковой – регулируется краном 3, верхнее положение.

4. Соедините баллон с атмосферой (нажмите кратковременно и отпустите клапан 4, рис. 3) – процесс 3 – 4. Подождите не менее 2 минут (процесс 6 – 7) и измерьте установившееся значение перепада давления Δp_2 . Данные запишите в табл. 1. Проведите аналогичные измерения 5 ÷ 7 раз.

Таблица 1

i	1	2	3	4	5	6	7
Δp_1 , мм							
Δp_2 , мм							

5. Вычислите средние значения и среднеквадратичные погрешности по формуле $S_{\langle x \rangle} = \sqrt{(\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2)/(n - 1)}$. Результаты занесите в табл. 2

Таблица 2

$\langle \Delta p_1 \rangle =$	$\langle \Delta p_2 \rangle =$
$\langle \Delta p_1^2 \rangle =$	$\langle \Delta p_2^2 \rangle =$
$S_{\langle \Delta p_1 \rangle} =$	$S_{\langle \Delta p_2 \rangle} =$

6. По формуле (4) определите среднее значение показателя адиабаты $\langle \gamma \rangle = 1/(1 - \langle \Delta p_2 \rangle / \langle \Delta p_1 \rangle)$.

7. Вычислите относительную погрешность

$$\Delta \gamma / \gamma = \sqrt{(S_{\langle \Delta p_1 \rangle} / \langle \Delta p_1 \rangle)^2 + (S_{\langle \Delta p_2 \rangle} / \langle \Delta p_2 \rangle)^2}.$$

8. Результат представьте в виде $\gamma = \langle \gamma \rangle \pm t_{n-1, P} \cdot \Delta \gamma$.

Задание 2. Определение показателя адиабаты воздуха с учетом реальных условий

Так как процесс 3 – 4 является адиабатным, то при проведении эксперимента необходимо, чтобы время, в течение которого давление в баллоне уменьшается от p_1 до p_0 , было достаточно мало, чтобы можно было пренебречь теплообменом с окружающим воздухом. Расчеты показывают, что это время порядка 0,1 с, а на практике всегда больше.

Рассмотрим влияние времени t , в течение которого клапан 4 (рис. 2, 3) остается открытым после достижения давления p_0 , на результат опыта. Величину t назовем временем выдержки. Предположим, что после достижения давления p_0 клапан 4 открыт еще некоторое время t , в течение которого происходит изобарный нагрев (4 – 6) за счет теплообмена газа со стенками баллона, а также уход части газа из баллона из-за его нагрева и расширения. После закрытия крана газ нагревается изохорно (6 – 7) и давление в баллоне достигает величины $p_0 + \Delta p$ (рис. 2). Точка 7 (конечное состояние газа) лежит на той же изотерме, что и точки 1, 3, 5. Очевидно, что Δp , которое в эксперименте измеряется вместо Δp_2 , и зависит от времени t . Таким образом, если не учитывать теплообмен и уход части газа из баллона за время выдержки, то рассчитанное значение по формуле (4) будет заниженным.

Рассмотрим процесс 4 – 6. Уравнение баланса энергии для газа в баллоне имеет вид

$$m C_p dT = k \cdot (T_0 - T) dt, \quad (5)$$

где C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;
 k – коэффициент теплоотдачи.

Переменную массу газа m в баллоне найдем из уравнения Менделеева–Клапейрона

$$m = Mp_0V_0 / (RT), \quad (6)$$

где T – температура газа в момент времени t ;

R и M – универсальная газовая постоянная и молярная масса газа (воздух).

Подставим (6) в (5). После интегрирования полученного выражения получим $\ln \frac{T_0 - T}{T} = -\frac{kRT_0t}{p_0V_0MC_p} + \ln C$. Постоянную интегрирования C найдем

из условия: при $t = 0$, $T = T_1 = T_0 - \Delta T_1$. Окончательно получим

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta T_1}{T_1} \exp\left(-\frac{k \cdot t}{m_0 C_p}\right), \quad (7)$$

После того, как в момент времени t (точка б) кран перекрывается, нагрев газа в баллоне продолжается изохорно (процесс 6 – 7), при этом давление достигает величины $p = p_0 + \Delta p$. Из условия изохорности процесса 6 – 7 имеем

$$\Delta p = p_0 \Delta T / (T_0 - \Delta T). \quad (8)$$

Для адиабатного процесса 3 – 4 запишем

$$\frac{\Delta T_1}{T_1} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{\Delta p_1}{p_0}. \quad (9)$$

Подставляя уравнения (8) и (9) в (7), получим

$$(\Delta p_1 / \Delta p) = \gamma / (\gamma - 1) \cdot \exp(kt / (m_0 C_p)). \quad (10)$$

Соотношение (10) учитывает как теплообмен, так и уход части газа из баллона при нагреве.

Прологарифмируем (10) и представим его в виде уравнения $y = A + Bx$:

$$\ln(\Delta p_1 / \Delta p) = \ln(\gamma / (\gamma - 1)) + (k / (m_0 C_p)) \cdot t, \quad (11)$$

где $y = \ln(\Delta p_1 / \Delta p)$, $x = t$, $A = \ln(\gamma / (\gamma - 1))$, $B = k / (m_0 C_p)$. (12)

График зависимости $\ln(\Delta p_1 / \Delta p)$ от t является прямой линией. Если эту прямую экстраполировать до $t = 0$, то она будет отсекают на оси ординат отрезок величиной A . Из (12) получим

$$\langle \gamma \rangle = e^A / (e^A - 1). \quad (13)$$

Проведение измерений

1. Включите приборы в сеть.
2. Накачайте насосом воздух в баллон (процесс 1 – 2) так, чтобы разность уровней воды в манометре (перепад давления) достигала величины $200 \div 300$ мм водяного столба. Подождите не менее 2 минут (процесс 2 – 3) и измерьте

установившееся значение перепада давления Δp_1 . Запишите это значение в табл. 2.

3. Установите нулевые показания секундомера. Включите клапан 4 (рис. 2, 3), то есть соедините баллон с атмосферой – процесс 3 – 4. Через время выдержки t (точка 6) отключите клапан 4 (рис. 2, 3). Подождите не менее 2 минут (процесс 6 – 7) и измерьте установившееся значение перепада давления Δp . Данные запишите в табл. 2. Проведите аналогичные измерения для 5 ÷ 7 значений времени t в диапазоне от 3 до 20 с.

Таблица 2

i	1	2	3	4	5	6	7
$t_i, \text{с}$							
$\Delta p_1, \text{мм}$							
$\Delta p, \text{мм}$							
$\ln(\Delta p_1/\Delta p)$							

4. Постройте график зависимости $\ln(\Delta p_1/\Delta p)$ от t . Покажите этот график преподавателю и дальнейшую обработку экспериментальных данных проведите по его указанию.

А. Графический метод

1. Экстраполируйте экспериментальную прямую графика зависимости $\ln(\Delta p_1/\Delta p)$ от t до пересечения с осью ординат при $t = 0$ и определите величину отрезка A .

2. По формуле (13) рассчитайте среднее значение $\langle \gamma \rangle = e^A / (e^A - 1)$.

$$\langle \gamma \rangle = \quad .$$

Б. Аналитический метод

1. Методом наименьших квадратов рассчитайте A .

2. По формуле (13) рассчитайте среднее значение $\langle \gamma \rangle = e^A / (e^A - 1)$.

$$\langle \gamma \rangle = \quad .$$

Контрольные вопросы

1. Какие термодинамические процессы происходят в рабочей массе воздуха при выполнении работы? Объясните по рис. 2.

2. Сформулируйте первое начало термодинамики и запишите его применительно к различным изопроцессам.

3. Выведите уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона). Представьте это уравнение и в параметрах p - T и V - T .

4. Вычислите показатель адиабаты для воздуха.