

Лабораторная работа № 18

Определение C_p/C_v методом Клемана и Дезорма

Цель работы: определение отношения теплоёмкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объёме $\gamma = C_p/C_v$.

Оборудование: насос, стеклянная ёмкость, водяной манометр, зажим, пробка.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Теплоемкостью называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить телу, чтобы увеличить его температуру на 1 К.

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

Теплоемкость единицы массы называется **удельной теплоемкостью**:

$$C_{y\delta} = \frac{dQ}{mdt}. \quad (2)$$

Теплоемкость одного моль вещества называется **молярной теплоемкостью**:

$$C = \frac{dQ}{\frac{m}{\mu} dT}. \quad (3)$$

где m — масса вещества, μ — молярная масса.

Согласно первому началу термодинамики, количество теплоты dQ , переданное телу, идет на увеличение его внутренней энергии dU и на работу dA , совершающую телом против внешних сил.

$$dQ = dU + dA \quad (4)$$

В выражении (4) dU является полным дифференциалом, а δQ и δA та-ковыми не являются.

Подставим (4) в (1):

$$C = \frac{dU}{dT} + \frac{dA}{dT} \quad (5)$$

где

$$dA = p dV \quad (6)$$

Теплоемкость будет различной в зависимости от того, нагревается тело при постоянном объеме ($dV = 0$ — изохорический процесс) или при постоянном давлении ($dP = 0$ — изобарический процесс). Пусть C_V и C_p — теплоемкости соответственно при постоянном объеме и постоянном давлении.

При изохорической процессе объем газа на изменяется и работа, как видно из уравнения (6), не совершается ($dA = 0$). Таким образом, все количество теплоты при изохорическом процессе идет на увеличение внутренней энергии ($\delta Q = dU$). Тогда из (5) получим:

$$C_V = \frac{dU}{dT}. \quad (7)$$

При изобарическом процессе изменяется объем газа, то есть $dA \neq 0$. Следовательно, сообщенное газу количество теплоты идет не только на увеличение внутренней энергии, но и на совершение работы:

$$C_p = \frac{dU}{dT} + \frac{dA}{dT} \quad (8)$$

Подставляя (7) в (8), получим:

$$C_p = C_V + \frac{dA}{dT}. \quad (9)$$

Как видно из (9), C_p больше C_V на величину работы, которую совершают газ при изобарическом расширении в результате повышения темпе-

ратуры на **1 К**. Найдем величину этой работы для **1 моля** идеального газа. Учитывая сравнения (8), запишем:

$$\frac{dA}{dT} = p \frac{dV}{dT} \quad (10)$$

Воспользуемся уравнением состояния идеального газа для одного моля:

$$pV = RT \quad (11)$$

Продифференцируем (11), учитывая что $p = const$:

$$pdV = RdT \quad (12)$$

Подставим (12) в (10) получим:

$$\frac{dA}{dT} = R . \quad (13)$$

Тогда для молярных теплоемкостей имеет место связь:

$$C_p = C_V + R . \quad (14)$$

Отношение C_p / C_v обозначается « γ ».

Оно играет в термодинамике весьма важную роль. В частности, оно входит в уравнения **адиабатического процесса** (уравнение Пуассона):

$$pV^\gamma = const . \quad (15)$$

Процесс называется **адиабатическим**, если отсутствует теплообмен с окружающей средой, т.е.

$$dQ = 0 . \quad (16)$$

Можно с достаточным приближением рассматривать всякое быстрое расширение или сжатие газа как процесс адиабатический, т.к. при этом не

успеет произойти значительный теплообмен между газом и окружающей средой.

Первое начало термодинамики для адиабатического процесса имеет вид:

$$-dU = dA \quad (17)$$

При адиабатическом расширении газ совершает работу за счет уменьшения внутренней энергии, при этом температура газа уменьшается.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 1) состоит из сосуда **A**, водяного манометра **M** и ручного насоса **H**. Сосуд герметически закрыт пробкой, в которой вставлены две трубы. Одна трубка, снабженная зажимом **K₁**, соединяет сосуд **A** с насосом **H**. Другая трубка соединяет сосуд **A** с манометром. Отверстие сбоку, закрытое пробкой **K₂**, служит для соединения **A** с атмосферой. Процесс определения отношения $\gamma = C_p / C_v$ состоит из трех этапов.

1. Насосом накачивают в сосуд воздух. Давление и температура в сосуде увеличивается. Закрывают зажим **K₁**. Через 2-3 минуты, благодаря теплообмену, температура воздуха в сосуде уменьшается и становится равной комнатной **T₁**. Давление при этом немного понижается. Обозначим его

$$p_1 = p_0 + h_1, \quad (18)$$

где p_0 — атмосферное давление,

h_1 — избыточное давление воздуха в сосуде над атмосферным.

Оно определяется по разности уровней воды в коленах манометра **M**. Выделим мысленно в сосуде **A** некоторую массу воздуха с объемом V_1 . Итак, **первое** состояние воздуха характеризуется параметрами p_1 , V_1 , T_1 . Оно изображено на рис. 2 точкой **1**.

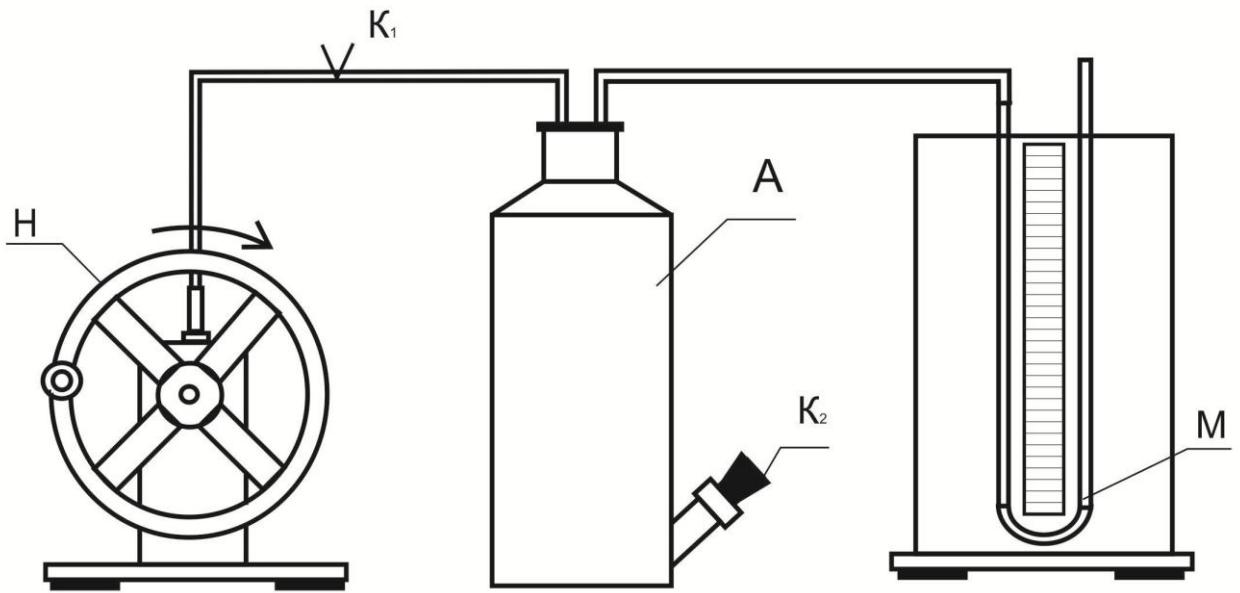


Рис.1 Схема установки. **H** – насос, **A** – сосуд, **M** – водяной манометр, **K₁** – зажим, **K₂** – пробка..

2. Быстро вынимают пробку, соединяя сосуд с атмосферой. Так как воздух в сосуде быстро расширяется, теплообмен с окружающей средой не успевает произойти. Процесс расширения считают **адиабатическим**. На рис. 2. линия 1-2 изображает адиабатический процесс. В результате расширения давления воздуха в сосуде уменьшится до атмосферного p_0 , температура понизится и станет T_2 . Объем выделенной массы воздуха увеличится до V_2 .

Второе состояние воздуха имеет параметры p_0 , V_2 , T_2 . Оно изображено на рис. 2 точкой **2**. Итак, в результате адиабатического процесса воздух из **1**-го состояние переходит во **2**-ое состояние. Следовательно, параметры этих состояний связаны уравнением Пуассона:

$$p_1 V_1^\gamma = p_o V_2^\gamma. \quad (19)$$

3. Как только давление воздуха в сосуде сравняется с атмосферным, пробкой **K₂** закрывают сосуд. За счет теплообмена с окружающей средой температура воздуха в сосуде увеличивается и становится равной T_1 . Давление тоже увеличивается и достигает некоторой величины $p_2 = p_o + h_2$,

где h_2 — разность уровней в коленах манометра. Так как сосуд оставался закрытым, объем выделенной массы воздуха не изменяется, остается

равным V_2 , т.е. в сосуде протекает **изохорический** процесс. Он изображен на рис. 2 линией 2-3.

Третье состояние воздуха имеет параметры p_2 , V_2 , T_1 .

Воздух в **1** и **3** состояниях имеет одинаковую температуру. Следовательно, для параметров этих состояний можно записать закон Бойля-Мариотта:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (20)$$

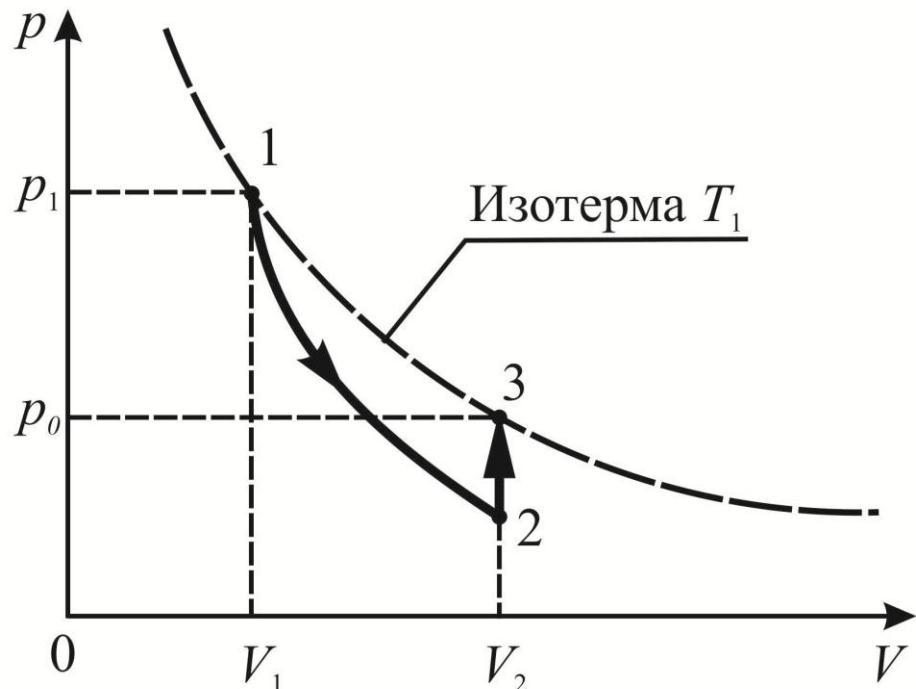


Рис. 2. График эксперимента.

4. Возведя уравнение (20) в степень γ и разделив его на уравнение (19), получим:

$$\frac{p_1^{\gamma-1}}{p_o} = \frac{p_2^\gamma}{p_o}. \quad (21)$$

Прологарифмировав уравнение (21), получим выражение для γ :

$$\gamma = \frac{\lg P_1 - \lg P_o}{\lg P_1 - \lg P_2}, \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} p_1 &= p_o + h_1 \\ p_2 &= p_o + h_2. \end{aligned}$$

Давления p_1 и p_2 обычно намного больше p_o , поэтому разложив $\lg p_1$ и $\lg p_2$ в ряд Тейлора, можно двумя первыми членами:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lg p_1 = \lg p_o + \frac{h_1}{p_o} \\ \lg p_2 = \lg p_o + \frac{h_2}{p_o} \end{array} \right. \quad (23)$$

Подставим (23) в (22), получим:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2} \quad (24)$$

где

h_1 — разность уровней жидкости в коленах манометра до того, как было произведено адиабатического расширения;

h_2 — разность уровней после того, как было произведено адиабатическое расширения и температуры в сосуде уже сравнялась с комнатной.

ПОРЯДОК РАБОТЫ.

1. Открывают зажим **K₁** и осторожно насосом нагнетают воздух в сосуд **A**.

При небрежности работающего жидкость в манометре может быть выброшена, поэтому нужно внимательно следить за уровнем жидкости.

Когда разность уровней в манометре достигает 25-30 см, прекращают накачивание и закрывают зажим **K₁**. Через 2-3 минуты, когда давление внутри сосуда окончательно установится, а температура воздуха в сосуде сравняется с комнатной температурой, определяют h_1 .

2. Вынуть пробку **K₂** на такое время, чтобы давление в сосуде успело сравняться с атмосферным и снова закрывают его. (Нельзя держать сосуд

открытым долго, так как этим заметно нарушается **адиабатичность** процесса). Выждав несколько минут, пока температура в сосуде не сравняется с комнатной, что определяют по неизменности уровней в манометре, определяют h_2 .

3. Вычислить γ по формуле (24).
4. Опыт повторить 7 раз.
5. Найти среднее арифметическое значение $\bar{\gamma}$:

$$\bar{\gamma} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \dots + \gamma_n}{n}.$$

6. Определить среднюю квадратичную ошибку среднего арифметического значения $S_{\bar{\gamma}}$:

$$S_{\bar{\gamma}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\gamma} - \gamma_i)^2}{n(n-1)}}.$$

7. При заданных доверительной вероятности $P = 0,95$ и числе опытов $n = 7$ определить доверительный интервал $\Delta\gamma$ найденного среднего арифметического значения отношения $\gamma = C_p / C_v$:

$$\Delta\gamma = S_{\bar{\gamma}} \cdot t_{P,n}.$$

Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1.

№	h_1 , м	h_2 , м	$h_1 - h_2$, м	γ	$\bar{\gamma}$	$ \bar{\gamma} - \gamma $	$S_{\bar{\gamma}}$	$\Delta\gamma$	$\gamma = \bar{\gamma} \pm \Delta\gamma$
1									
2									
3									
...									
7									

Контрольные вопросы

1. Что называется теплоемкостью тела, удельной теплоемкостью, теплоемкостью модуля?
2. Как связаны друг с другом C_p и C_v ; что больше и почему?
3. Какой процесс называется адиабатическим? Написать уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона).
4. Сформулировать и записать 1 начало термодинамики.
5. Как изменяется внутренняя энергия тела при адиабатическом процессе?
6. Чему равняются теплоемкости при изотермическом и при адиабатическом процессах?
7. Считая воздух идеальным газом? Записать значение C_p и C_v для воздуха и вычислить γ .
8. Когда при выполнении этой работы совершаются изохорический процесс?
9. Когда при выполнении этой работы выполняется адиабатические процессы.
10. Параметры каких двух состояний воздуха в сосуде связаны законом Бойля-Мариотта?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Механика. Молекулярная физика. 350 с. т.1.— М. Наука. 1989.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Учебное пособие для вузов. В 5 книгах. – М. Астрель/ACT 2003 г.
3. Трофимова Т.И. Краткий курс физики: Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, испр.– 352 стр – М: Высшая школа, 2002 г.
4. Грабовский Р.И. Курс физики: Учебник для вузов. Изд. 6-е – 608 с. {Учебники для вузов; специальная литература}, СПб; Лань, 2002 г.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учебник для вузов. Изд. 4-е, испр.– 607 с. М: Высшая школа, 1989 г.