

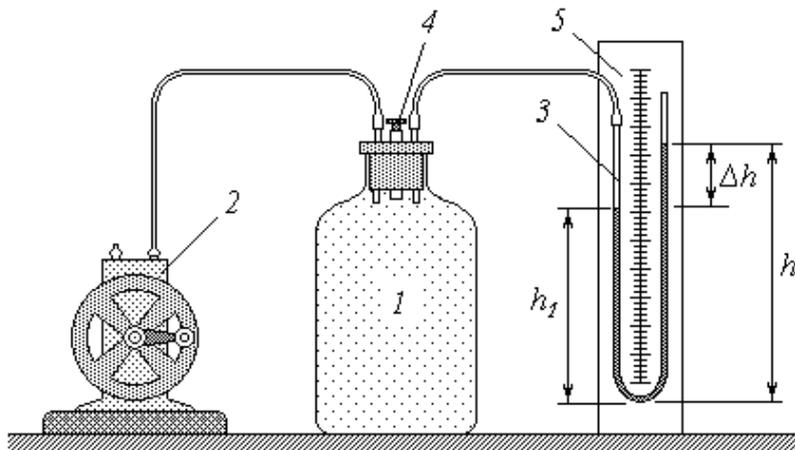


Работа 2.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗА МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: 1) изучение первого начала термодинамики в различных изопроцессах;
2) экспериментальное определение показателя адиабаты для воздуха.

Схема экспериментальной установки



- 1 – сосуд с воздухом;
- 2 – насос;
- 3 – манометр;
- 4 – пробка;
- 5 – линейка

Описание установки и методики измерений

Основной элемент лабораторной установки – сосуд 1 с воздухом, соединенный гибкими шлангами с насосом 2 и манометром 3. Сосуд закрыт пробкой 4, вынимая которую можно обеспечить сообщение воздуха в сосуде с атмосферой. Линейка 5 служит для измерения разности уровней в коленах манометра.

Манометр – прибор, измеряющий разность давлений газа, представляет собой U-образную стеклянную трубку с подкрашенной водой. Одно колено манометра сообщается через трубку с сосудом 1, а другое (открытое) – с атмосферой. Уровни воды в коленах манометра h_1 и h_2 измеряются с помощью линейки 5.

При повышении давления в сосуде уровень воды в левом (на схеме) колене понижается, а в правом – повышается, пока давление столба воды $\Delta h = h_2 - h_1$ не уравнивает перепад давлений Δp :

$$\Delta p = \rho_в g (h_1 - h_2), \quad (0)$$

где $\rho_в$ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

В открытом сосуде устанавливаются температура T_1 и давление p_1 воздуха, равные соответствующим параметрам окружающей атмосферы. На рис. 1 изображена p - V диаграмма, где это начальное состояние воздуха

обозначено точкой 1. Под величиной V здесь и в дальнейшем будем иметь в виду объем достаточно малой массы воздуха (например, 1 г), постоянно находящегося внутри сосуда.

Если сосуд закрыть пробкой и закачать в него из атмосферы некоторое дополнительное количество воздуха, то давление в нем повысится до величины p_2 . При достаточно быстром осуществлении этого процесса теплообмен с окружающей средой не успевает происходить, и сжатие можно считать адиабатическим (кривая 1-2). Совершенная внешними силами работа сжатия целиком переходит во внутреннюю энергию газа; следовательно, повышается и его температура. По окончании работы насоса объем газа остается неизменным, и начинается его изохорическое охлаждение до температуры окружающей среды T_1 . На диаграмме этот процесс изображен отрезком 2-3. Понижение температуры при постоянном объеме ведет, как известно, к уменьшению давления до значения p_3 , которое все же превышает (из-за ранее накаченного воздуха) атмосферное давление p_1 на некоторую величину Δp_I .

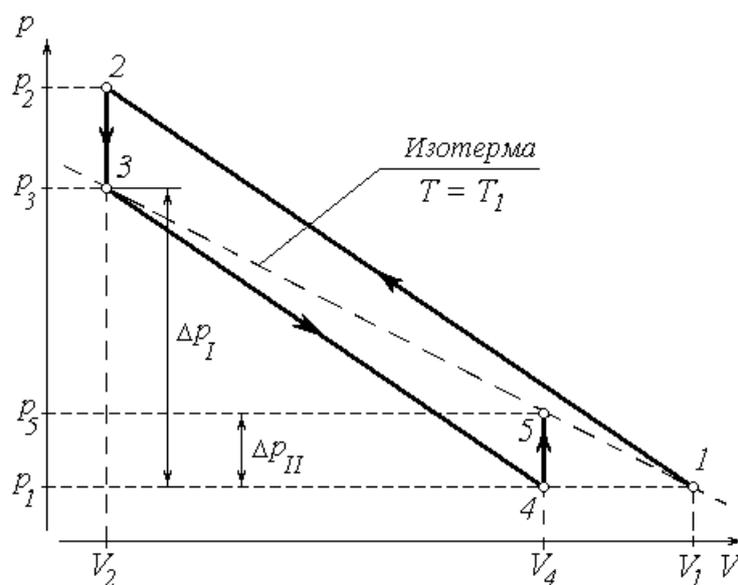


Рис. 1

Если теперь открыть сосуд, вынув пробку, и тут же опять закрыть, то давление воздуха в нем сравняется с атмосферным p_1 за счет того, что часть воздуха покинет сосуд. Это падение давления происходит очень быстро, и процесс расширения 3-4 также можно считать адиабатическим. Внутренняя энергия газа уменьшается на величину работы расширения, поэтому его температура падает ниже установившегося ранее значения T_1 . Далее воздух в закрытом сосуде нагревается при постоянном объеме до температуры T_1 (на диаграмме – отрезок изохоры 4-5). Установившееся в конце этого процесса давление p_5 превышает (вследствие роста температуры) начальное значение p_1 на величину Δp_{II} .

Рассмотрим подробнее два заключительных процесса: адиабатическое расширение 3-4 и изохорическое нагревание 4-5. Для первого из них запишем уравнение адиабаты

$$p_3 V_3^\gamma = p_4 V_4^\gamma, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ – показатель адиабаты, представляющий собой отношение теплоемкости газа при постоянном давлении C_p к его теплоемкости при постоянном объеме C_v .

Учитывая, что в состоянии 4 давление воздуха в сосуде равно атмосферному ($p_4 = p_1$), а объем имеет то же значение, что и в конечном состоянии 5 ($V_4 = V_5$), перепишем (1) в виде

$$\frac{p_3}{p_1} = \left(\frac{V_5}{V_3} \right)^\gamma. \quad (2)$$

Температура воздуха в состояниях 3 и 5 одинакова и равна температуре окружающей атмосферы T_1 . Воспользовавшись уравнением изотермы

$$p_3 V_3 = p_5 V_5,$$

находим

$$\frac{V_5}{V_3} = \frac{p_3}{p_5},$$

и уравнение (2) принимает вид

$$\frac{p_3}{p_1} = \left(\frac{p_3}{p_5} \right)^\gamma,$$

откуда показатель адиабаты

$$\gamma = \frac{\ln \frac{p_3}{p_1}}{\ln \frac{p_3}{p_5}}. \quad (3)$$

Преобразуем знаменатель дроби в правой части выражения (3)

$$\ln \frac{p_3}{p_5} = \ln \left(\frac{p_3}{p_1} \cdot \frac{p_1}{p_5} \right) = \ln \frac{p_3}{p_1} - \ln \frac{p_5}{p_1}, \quad (4)$$

а также величины давлений p_3 и p_5 (см. рис. 1):

$$p_3 = p_1 + \Delta p_I, \quad p_5 = p_1 + \Delta p_{II};$$

тогда

$$\ln \frac{p_3}{p_1} = \ln\left(1 + \frac{\Delta p_I}{p_1}\right), \quad \ln \frac{p_5}{p_1} = \ln\left(1 + \frac{\Delta p_{II}}{p_1}\right). \quad (5)$$

Как известно, атмосферное давление эквивалентно давлению столба воды высотой около 10 м. Перепады давлений, измеряемые в данной работе манометром, составляют величины порядка нескольких сантиметров водного столба. Таким образом, величины Δp_I и Δp_{II} несоизмеримо малы по сравнению с p_1 , и отношения

$$\frac{\Delta p_I}{p_1} \ll 1; \quad \frac{\Delta p_{II}}{p_1} \ll 1.$$

Используем известное в математике соотношение, имеющее место при малых x ($x \ll 1$):

$$\ln(1 + x) \approx x.$$

Тогда выражения (5) и (4) преобразуются к виду

$$\ln \frac{p_3}{p_1} = \frac{\Delta p_I}{p_1}, \quad \ln \frac{p_5}{p_1} = \frac{\Delta p_{II}}{p_1};$$

$$\ln \frac{p_3}{p_5} = \frac{\Delta p_I - \Delta p_{II}}{p_1},$$

а их подстановка в (3) дает

$$\gamma = \frac{\Delta p_I}{\Delta p_I - \Delta p_{II}}. \quad (6)$$

Из формулы (0) следует, что перепад давлений Δp прямо пропорционален разности Δh уровней воды в коленах манометра. С учетом этого выражение (6) примет вид

$$\gamma = \frac{\Delta h_I}{\Delta h_I - \Delta h_{II}}, \quad (7)$$

где

$$\Delta h_I = h_2^I - h_1^I; \quad (8)$$

$$\Delta h_{II} = h_2^{II} - h_1^{II}; \quad (9)$$

h_1^I и h_2^I – высота уровня воды в закрытом (на схеме – левом) и открытом (правом) коленах манометра после изохорического охлаждения, т.е. в состоянии 3; h_1^{II} и h_2^{II} – то же, после изохорического нагревания (состояние 5).

Порядок измерений и обработки результатов

1. Откройте сосуд 1 с воздухом, вынув пробку 4. Дождавшись установления постоянных одинаковых уровней воды в манометре 3, закройте сосуд.

2. Вращая рукоятку насоса 2, следите за манометром. По достижении разности уровней около 15-20 см прекратите накачивать воздух (в противном случае может произойти выброс воды из открытого колена манометра!).

3. Наблюдайте показания манометра в течение двух-трех минут (разность уровней должна уменьшаться). После установления неизменной разности уровней измерьте и занесите в таблицу значения h_1^I и h_2^I . Рассчитайте по формуле (8) и запишите в таблицу перепад Δh_I .

Номер опыта	h_1^I , мм	h_2^I , мм	Δh_I , мм	h_1^{II} , мм	h_2^{II} , мм	Δh_{II} , мм	γ	$\Delta\gamma$	$(\Delta\gamma)^2$
1									
2									
...
10									
$\Sigma =$								$\Sigma =$	

4. Вынув пробку, откройте и быстро закройте сосуд. Следите за показаниями манометра (разность уровней должна увеличиваться). Выждав две-три минуты до установки постоянного перепада давлений, измерьте и занесите в таблицу значения h_1^{II} и h_2^{II} ; по формуле (9) рассчитайте и запишите установившуюся разность уровней Δh_{II} .

5. Повторите измерения, описанные в пп. 1-4, еще девять раз.

6. Для каждого из десяти проведенных опытов вычислите по формуле (7) и занесите в таблицу значения показателя адиабаты γ .

7. Найдите среднее значение показателя адиабаты $\bar{\gamma}$. Выполните все расчеты, необходимые для оценки случайной погрешности определения величины γ . Задаваясь доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$, рассчитайте погрешность $\Delta_s\gamma$.

8. Сделав необходимые округления, запишите окончательный результат измерения показателя адиабаты (отношения теплоемкостей) воздуха.

Контрольные вопросы

1. Внутренняя энергия идеального газа. Работа при его расширении и сжатии.

2. Количество тепла. Теплоемкость. Удельная и молярная теплоемкости вещества.
3. Первое начало термодинамики. Изотермический, изохорический и изобарический процессы. Графическое изображение этих процессов в координатах p - V , p - T , V - T .
4. Число степеней свободы молекул газа. Теория теплоемкостей идеального газа.
5. Адиабатический процесс. Уравнение адиабаты и ее графическое изображение в координатах p - V , p - T , V - T .