

Лабораторная работа В4.03

ЗАКОН БОЙЛЯ-МАРИОТТА

Цель работы

Исследование зависимости давления воздуха от объема при постоянной температуре и количестве вещества.

Задачи

1. Получить зависимость давления воздуха от его объёма.
2. Определить универсальную газовую постоянную.

Введение

Состояние некоторой массы газа определяется значениями трёх параметров: давления p , объема V и температуры T . Соотношение, устанавливающее связь между параметрами, – уравнение состояния – в общем виде задаётся выражением

$$f(p, V, T) = 0.$$

Для идеального газа уравнение состояния имеет вид:

$$pV = nRT, \tag{1}$$

где n – количество вещества газа, $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Уравнение состояния (1), называемое уравнением Менделеева-Клапейрона, было получено на основе анализа частных эмпирических газовых законов, один из которых – закон Бойля-Мариотта. В 1662 году ирландский физик Роберт Бойль экспериментально установил, что при постоянной температуре произведение давления на объём данной массы газа остаётся постоянным. Независимо от Бойля

французский физик Эдм Мариотт обнаружил тот же закон в 1676 году. Мариотт дополнительно отметил, что закон справедлив только при постоянной температуре.

Аналитически закон Бойля-Мариотта можно записать следующим образом:

$$pV = \text{const} \quad \text{при } T = \text{const}. \quad (2)$$

Процесс, протекающий при постоянной температуре, называется *изотермическим*. В соответствии с (2) при постоянной температуре давление газа изменяется обратно пропорционально его объёму. На диаграмме p, V (рис.1) этот процесс изображается гиперболой – изотермой.

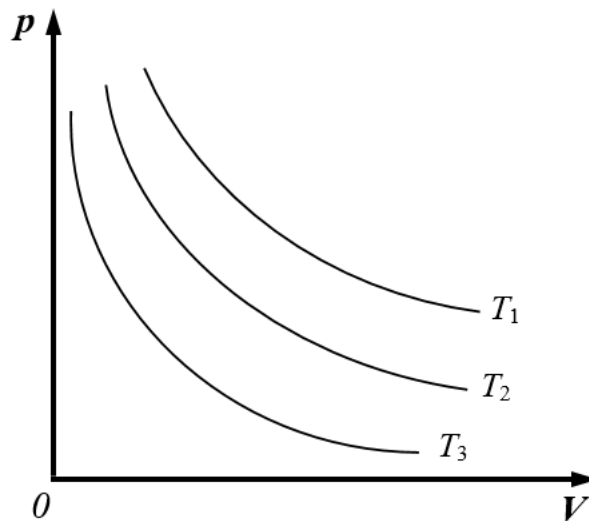


Рис. 1. Качественный вид зависимости давления воздуха от объема при разных температурах

Справедливость закона Бойля-Мариотта можно проверить экспериментально, измеряя давление газа в цилиндрическом сосуде при изменении положения поршня (рис. 2). Зная расстояние S от основания цилиндра до поршня и диаметр поршня D (равный диаметру основания цилиндра), можно определить объём газа в цилиндре:

$$V_{\text{цил}} = S \cdot \frac{\pi D^2}{4}.$$

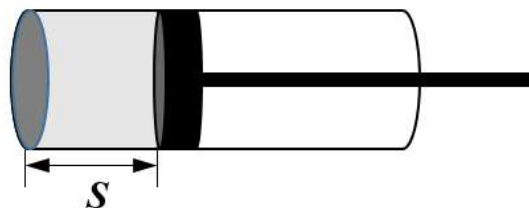


Рис. 2. Исследуемый газ в цилиндре с поршнем

Учитывая неизбежный мертвый объем V_1 газа в манометре, с помощью которого измеряется давление в сосуде, объем исследуемого газа

$$V = V_{\text{цил}} + V_1 = S \cdot \frac{\pi D^2}{4} + V_1. \quad (3)$$

Если при перемещении поршня температуру газа в цилиндре поддерживать постоянной, то, в соответствии с законом Бойля-Мариотта, давление газа под поршнем будет изменяться обратно пропорционально его объёму. Для удобства экспериментальной проверки зависимость $p(V)$ следует линеаризовать, т.е. использовать новые переменные, зависимость между которыми была бы линейной. В нашем случае такими переменными являются p и $1/V$. Зная угловой коэффициент зависимости $p(1/V)$ при заданном количестве вещества исследуемого газа и температуре, можно определить универсальную газовую постоянную R .

Экспериментальная установка

Общий вид экспериментальной установки показан на рисунке 3.

Перед началом эксперимента через открытый клапан в цилиндрический сосуд 1 подают определённое количество воздуха, который в условиях эксперимента можно рассматривать как идеальный газ. Исследуемый объем воздуха ограничен поршнем 2, который может свободно перемещаться внутри сосуда. Шкала 3, нанесённая на поверхность цилиндра, позволяет определять положение поршня. Давление исследуемого газа внутри цилиндра определяется

манометром 4 в барах (1 бар = 100 кПа).

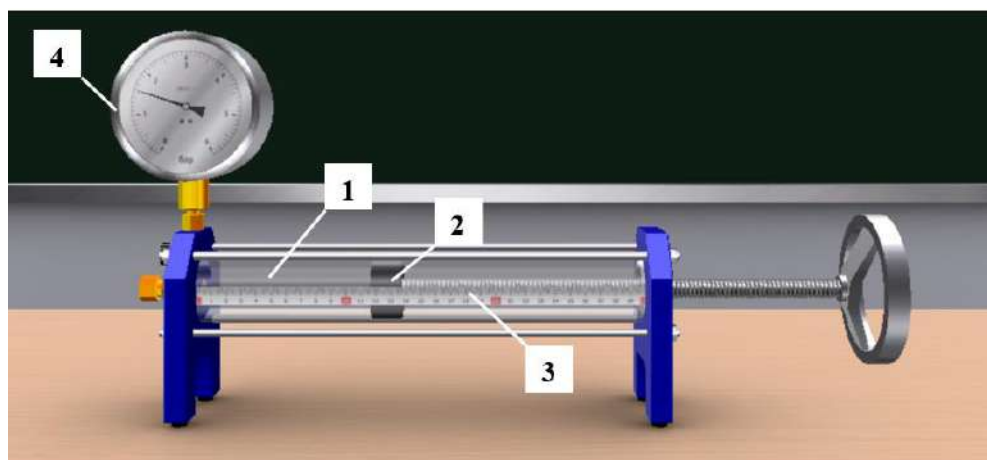


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки. 1 – цилиндрический сосуд, 2 – поршень, 3 – шкала, 4 – манометр

Порядок проведения эксперимента

1. Занесите в таблицу 1 предложенные преподавателем исходные данные: температуру газа T и количество вещества n .
2. Запустите программу виртуальной лабораторной работы «Закон Бойля-Мариотта». Нажмите кнопку «Начать эксперимент».
3. На панели параметров эксперимента (рис.4) установите значения температуры и количество вещества.
4. Изменяя положение поршня S от 3 см до 27 см, проследите за изменениями показаний манометра.
5. Получите файл результатов измерений *data_sheet.csv*, в котором отображаются значения положения поршня S и давления p .

Пол. поршня, S [см]:

Темп. газа, T [°C]:

Кол. газа, n [мМоль]:

Диам. поршня, D [см]:

Длина камеры, L [см]:

«Мертвый» объем манометра:
значение, V_1 [см³]:

Универс. газовая постоянная:
 R [Дж/(моль·К)]:

Рис. 4. Панель параметров эксперимента

Таблица 1. Зависимость давления воздуха от положения поршня

$T = \dots\dots K, \quad n = \dots\dots \text{моль}$				
№	S , см	p , бар	V , см³	$1/V$, м⁻³
1				
2				
...				

Обработка результатов

1. По формуле (3) вычислите объем воздуха в камере V и величину $1/V$. Результаты занесите в таблицу 1.
2. По данным таблицы 1 постройте зависимость $p(1/V)$.
3. С помощью метода парных точек определите угловой коэффициент зависимости $p(1/V)$:

$$\alpha = \frac{\Delta p}{\Delta(1/V)}.$$

Обратите внимание на единицы измерения. Результаты вычислений заносите в таблицу 2.

Таблица 2. Вычисление углового коэффициента α зависимости $p = p(1/V)$

Пары точек i – j	Δp_{ij} , Па	$\Delta(1/V)_{ij}$, м ⁻³	α_{ij} , Па·м ³	$\alpha_{ij} - \langle \alpha \rangle$, Па·м ³	$(\alpha_{ij} - \langle \alpha \rangle)^2$, (Па·м ³) ²
...					
			$\langle \alpha \rangle =$		$\sum_{ij} (\alpha_{ij} - \langle \alpha \rangle)^2 =$

4. Вычислите среднее значение углового коэффициента $\langle \alpha \rangle$ и его случайную погрешность $\Delta \alpha$.

5. Определите универсальную газовую постоянную

$$R = \frac{\langle \alpha \rangle}{nT}.$$

6. Вычислите относительную и абсолютную погрешность найденного значения универсальной газовой постоянной:

$$\delta R = \delta \alpha = \frac{\Delta \alpha}{\alpha},$$

$$\Delta R = R \cdot \delta R.$$

7. Запишите окончательный результат для универсальной газовой постоянной. Сравните полученную величину с табличным значением.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается закон Бойля-Мариотта?
2. Как выглядит зависимость давления идеального газа от занимаемого им объема при постоянной температуре?
3. Какой величине соответствует угловой коэффициент зависимости $p(1/V)$?
4. На рисунке 1 сравните температуры газа T_1 , T_2 и T_3 , которым соответствуют изотермы.

Литература

1. Детлаф А. А. Курс физики: учебное пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. 9-е изд., стер. М.: Академия, 2014. 719с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики: учебное пособие: в 3 томах / И. В. Савельев. 21-е изд., стер. СПб.: Лань, 2026. Том 1: Механика. Молекулярная физика. 448 с.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики: учебное пособие для физических специальностей вузов: [в 5 томах] / Д. В. Сивухин. Изд. 6-е, стер. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. Т. 2: Термодинамика и молекулярная физика. 544 с.
4. Физика. Практическая обработка экспериментальных данных: метод. указания / сост.: Б. Д. Агапьев, В. В. Козловский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 61 с.