

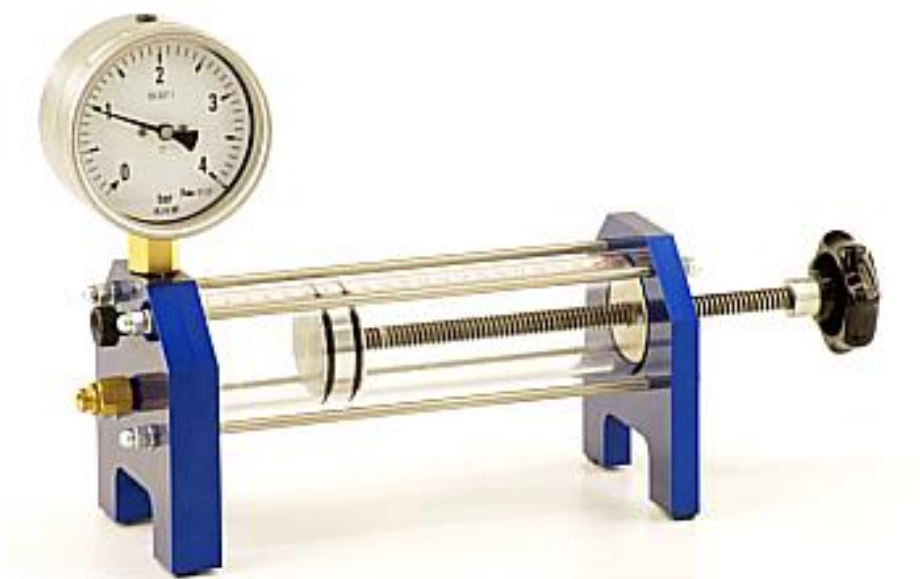


**ФИЛИАЛ МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА В ГОРОДЕ БАКУ**

**Физический факультет**

*Лабораторная работа 1*

**Закон Бойля-Мариотта**



**БАКУ 2017**

## Цель работы

### Экспериментальное изучение изотермического процесса в газе

#### Идея эксперимента

Изменяя в широких пределах объем разных масс воздуха и измеряя давление, можно убедиться в выполнении закона Менделеева-Клапейрона для изотермических процессов.

#### Теоретическое введение

Закон Бойля-Мариотта — один из основных газовых законов, открытый в 1662 г. Бойлем и независимо от него Мариоттом в 1676 г. Согласно этому закону, при постоянных температуре и массе газа произведение давления газа и его объема постоянно:

$$pV = \text{const} . \quad (1.1)$$

В современном понимании этот закон представляет собой следствие уравнения состояния идеального газа Менделеева-Клапейрона (1834 г.):

$$pV = \nu RT , \quad (1.2)$$

где  $p$  – давление,  $V$  – объем,  $\nu$  – количество молей газа,  $T$  – абсолютная температура,  $R = 8,3144598$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная. Несмотря на то, что идеальных газов, строго говоря, не существует, модель идеального газа очень хорошо описывает реальные достаточно разреженные газы, в которых:

- 1) можно пренебречь потенциальной энергией взаимодействия частиц, составляющих газ, по сравнению с их кинетической энергией;
- 2) суммарный объем частиц газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда);
- 3) между частицами нет дальнедействующих сил.
- 4) время взаимодействия между частицами при столкновениях пренебрежимо мало по сравнению со средним временем между столкновениями.

## Эксперимент

### Экспериментальная установка

Для экспериментальной проверки закона Бойля-Мариотта необходимо провести измерение зависимости давления от объема при постоянной температуре. Эти измерения проводятся на установке, показанной на рис. 1.1. Она состоит из прозрачного цилиндра 1, в котором перемещается герметичный поршень 2 с помощью винтовой подачи, приводимой во вращение ручкой 3. В целях безопасности рабочий цилиндр заключён в другой прозрачный цилиндр из акрилата. Клапан 4 служит для подачи и выпуска газа в левую рабочую часть цилиндра. Давление воздуха в этой части измеряется абсолютным манометром 5, проградуированным в барах ( $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$ ). На цилиндре нанесена линейная шкала 6, позволяющая определять положение поршня с точностью до 1 мм. На установке имеется предохранительный клапан 7, исключающий превышение давления свыше максимально безопасного значения 4 бар.

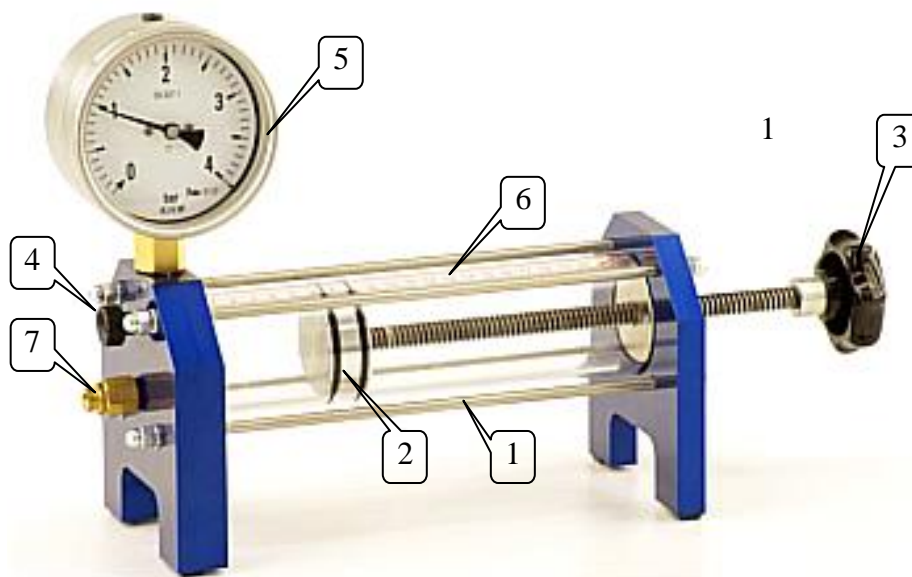


Рис. 1.1. Экспериментальная установка

#### *Параметры установки*

Внутренний диаметр цилиндра: 40 мм

Поршень: диаметр  $d = 40$  мм

Допустимое давление: макс. 4 бар

## Проведение эксперимента

### Измерения

Измерения зависимостей  $p(V)$  следует провести для четырех разных масс воздуха. Количество воздуха определяется начальным положением поршня при запуске воздуха в цилиндр через клапан 4.

1. Откройте клапан 4, повернув его ручку против часовой стрелки. Поставьте поршень в конец цилиндра на отметку  $x = 20$  см и закройте клапан. Координата поршня определяется по его левой части. Запишите начальное давление воздуха (равное атмосферному) в табл. 1.1.

2. Перемещая поршень каждый раз на 1 см, записывайте давление  $p_1$  вплоть до достижения 3.8 бар. Все данные заносите в табл. 1.1. При каждом изменении объема нужно подождать около минуты, чтобы система пришла в тепловое равновесие с окружающей средой, при этом показания манометра должны немного уменьшиться и далее перестать изменяться.

Таблица 1.1

**Зависимость давления от координаты поршня**

$x$ см	$p_1$ бар	$p_2$ бар	$p_3$ бар	$p_4$ бар	$V$ см <sup>3</sup>	$y = 1/V$ см <sup>-3</sup>	$\sigma_y$ см <sup>-3</sup>
20,0							
19,0							

3. Откройте клапан 4. Поставьте поршень на отметку  $x = 15$  см и закройте клапан. Перемещая поршень каждый раз на 1 см (сначала в сторону увеличения объема до  $x = 20$  см, а затем в сторону уменьшения объема) записывайте давление  $p_2$ , вплоть до достижения 3.8 бар.

4. Повторите п. 3 для начальных координат поршня  $x = 10$  см и  $x = 5$  см и запишите в табл. 1.1 соответствующие давления  $p_3$  и  $p_4$ .

Поскольку предусмотрены только однократные измерения, погрешности измерения определяются приборными погрешностями. Для всех давлений погрешность манометра можно оценить в 1/3 деления шкалы, то есть  $\sigma_p \approx 0,03$  бар, а погрешности установки поршня  $\sigma_x \approx 0,5$  мм.

После выполнения всех четырех серий измерений откройте клапан 4 для установления в цилиндре атмосферного давления и снова закройте его.

### Обработка результатов

1. Для всех значений  $x$  рассчитайте соответствующий объем  $V = Sx = \pi d^2 x / 4$ , его обратную величину  $y = 1/V$  и ее погрешность  $\sigma_y = y \frac{\sigma_x}{x}$ .

2. Постройте на одном графике все четыре измеренные зависимости  $p_i(V)$ , а на втором графике –  $p_i(y)$ , изобразив также интервалы их погрешностей.

3. Согласно закону Бойля-Мариотта зависимости  $p_i(y)$  должны быть прямыми линиями. Аппроксимируйте их с помощью МНК линейными зависимостями  $p_i = A_i \cdot y$  с учетом погрешности  $\sigma_p$  (в стандартном варианте МНК значения аргумента  $y$  считаются точными). Запишите полученные значения коэффициента корреляции  $r$ , коэффициентов  $A_i$  и их погрешностей  $S_{A_i}$  в табл. 1.2. Величины  $A_i$  переведите в джоули, учитывая, что  $1 \text{ бар} \cdot 1 \text{ см}^3 = 10^{-1} \text{ Дж}$ .

Таблица 1.2

**Величина  $pV$  для различных количеств молей газа**

$i$	$A = pV$ Дж	$S_A$ Дж	$r$	$v/v_{\max}$
1				0,25
2				0,5
3				0,75
4				1

4. Полученные величины  $A_i$  равны произведениям  $(pV)_i$  для каждой серии измерений с разными начальными количествами воздуха ( $i = 1 \dots 4$ ). Количество молей воздуха в каждой серии измерений соотносятся как начальные объемы воздуха в каждой серии:

$$v_1 : v_2 : v_3 : v_4 = x_1 : x_2 : x_3 : x_4 = 1 : 0.75 : 0.5 : 0.25$$

(разумеется, указанные цифры соответствуют только тем начальным объемам, которые были выставлены согласно приведенным выше рекомендациям). Запишите в таблицу 2 отношения  $v/v_{\max}$  для каждой серии.

5. Постройте график  $pV$  в зависимости от  $v/v_{\max}$  с изображением интервалов погрешностей  $S_{A_i}$  для значений  $pV$ . С помощью МНК с учетом погрешностей  $S_{A_i}$  аппроксимируйте график линейной зависимостью  $pV = B \cdot (v / v_{\max})$ , где  $B$  – константа, и запишите получившийся коэффициент корреляции  $r$ . Близость  $r$  к единице будет подтверждением того, что линейная модель правильна и величины  $pV$  в каждой серии измерений прямо пропорциональны количеству молей газа в данной серии.

6. Для обоснования изотермичности измерений определите время  $\tau$  тепловой релаксации газа в цилиндре. Это время  $\tau$  зависит от параметров газа и характерного линейного размера  $L$  сосуда, на котором образуется градиент температур. Его оценка ([2], §53) дает:

$$\tau \approx \frac{\rho C_V}{\mu \lambda} L^2, \quad (1.3)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха,  $C_V$  – молярная теплоемкость,  $\mu$  – молярная масса,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха. Для оценочного расчета можно взять величину  $L$ , равной радиусу цилиндра ( $L \approx 0.02$  м), и  $\lambda \approx 24$  мВт/(м·К). Плотность воздуха можно рассчитать, зная температуру и давление воздуха в лаборатории. Рассчитайте время тепловой релаксации и сравните его со временем ожидания, которое было рекомендовано в разделе «Измерения» для установления теплового равновесия системы при каждом измерении (около минуты). Разумеется, это будет грубая оценка. В реальности, время тепловой релак-

сации будет больше, если учесть конечность величины теплопроводности стенок сосуда и скорость теплопередачи тепла от сосуда в окружающую атмосферу.

### **Основные итоги работы**

*В результаты проведения измерений показывается выполнение закона Менделеева-Клапейрона для изотермических процессов.*

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте цель работы.
2. Что такое идеальный газ с точки зрения кинетической теории; с точки зрения термодинамики?
3. Опишите установку и порядок выполнения работы.
4. Поясните, в каких случаях при изучении поведение реальных газов можно пользоваться моделью идеального газа?
5. Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа и поясните его.
6. Что такое моль вещества?
7. Сформулируйте законы идеального газа. Приведите примеры графиков изотерм, изобар, изохор.
8. Что будет со временем тепловой релаксации (1.3) для сжатого или разреженного состояний воздуха, получающихся при измерениях?

### **Литература**

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит, 2006. Глава I, §7.
2. Матвеев А.Н. “Молекулярная физика”, М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. §10, 18.
3. Алешкевич В.А. Курс общей физики. Молекулярная физика. М.: Физматлит", 2016. Лекция