



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

Лабораторный практикум
«Определение молярной газовой
постоянной»
по дисциплине

«Физика»

Авторы
Шкиль Т.В.,
Мардасова И.В.,
Беликова Т.С.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

Указания содержат краткую теорию по теме «Молекулярная физика»; описание установки и методику экспериментального определения молярной газовой постоянной.

Методические указания предназначены для студентов инженерных специальностей всех форм обучения, в программу учебного курса которых входит выполнение лабораторных работ по физике (раздел «Молекулярная физика и термодинамика»).

Авторы

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»

Шкиль Т. В.,

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»

Мардасова И. В.,

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»

Беликова Т. С.



Оглавление

Лабораторная работа М-26.....	4
Определение молярной газовой постоянной	4
Список литературы	11

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА М-26

Определение молярной газовой постоянной

Цель работы: экспериментальная проверка закона Бойля-Мариотта и определение молярной газовой постоянной.

Оборудование: экспериментальный модуль, персональный компьютер и универсальный блок «Кобра-3» для сопряжения модуля с компьютером.

Краткая теория

Идеальный газ - это газ, молекулы которого можно рассматривать как материальные точки, а взаимодействие молекул носит характер абсолютно упругого удара (при низком давлении и высокой температуре реальные газы приближаются к идеальным).

Состояние некоторой массы газа определяется тремя термодинамическими параметрами: давлением p , объемом V и абсолютной температурой T .

Между параметрами газа существует определенная связь, называемая уравнением состояния. Уравнение, связывающее параметры состояния идеального газа, называется *уравнением состояния идеального газа* или *уравнением Клапейрона*:

$$\frac{pV}{T} = const. \quad (1)$$

Для данной массы идеального газа отношение произведения давления на объем к абсолютной температуре есть величина постоянная.

Д.И.Менделеев вычислил значение константы $\frac{pV}{T}$ для определенного количества идеального газа, а именно для одного моля.

1 *моль* – это количество вещества, в котором содержится столько молекул, сколько их содержится в 12 г углерода $^{12}_6C$. Моль – одна из основных единиц СИ. *Молярная масса* M – масса одного моля. Число молекул, содержащихся в одном моле любого вещества называется *числом Авогадро* N_A :

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}.$$

Согласно закону Авогадро, 1 моль любого газа при нор-

мальных условиях ($T_0 = 273 \text{ K}$, $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$) имеет объем $V_M = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ($1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$).

Для одного моля

$$\frac{p_0 V_M}{T_0} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{ моль}}{273 \text{ K}} = 8,31 \frac{\text{ Дж}}{\text{ моль} \cdot \text{ K}};$$

$$R = 8,31 \frac{\text{ Дж}}{\text{ моль} \cdot \text{ K}} \text{ – молярная газовая постоянная.}$$

Для произвольной массы газа m , содержащей ν молей,

$$\nu = \frac{m}{M}, \quad \frac{pV}{T} = \nu R, \quad \frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R.$$

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой *уравнение Менделеева-Клапейрона – уравнение состояния идеального газа произвольной массы*.

Зная массу и молярную массу вещества, можно рассчитать число молекул N , содержащихся в данной массе:

$$N = N_A \cdot \nu = N_A \cdot \frac{m}{M}.$$

Уравнение (1) объединяет в себе три частных случая, три эмпирических закона для изопроцессов, т. е. процессов, при которых один из параметров остается постоянным.

1. Изотермическим называется процесс, происходящий при постоянной температуре, т. е. $T = const$.

При $T = const$ и $m = const$ уравнение (1) приобретает вид:

$$pV = const \quad \text{или} \quad p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Закон Бойля-Мариотта: для данной массы идеального газа при постоянной температуре произведение давления на объем есть величина постоянная.

Графики зависимости между параметрами состояния газа при $T = const$ представлены на рис. 1.

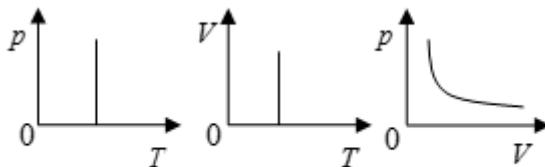


Рис. 1

2. Изобарным называется процесс, происходящий при по-

стоянном давлении, т. е. $p = const$. При $p = const$ и $m = const$ уравнение (1) приобретает вид:

$$\frac{V}{T} = const \quad \text{или} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Закон Гей-Люссака: для данной массы идеального газа при постоянном давлении объем прямо пропорционален абсолютной температуре.

Графики зависимости между параметрами состояния газа при $p = const$ представлены на рис. 2.

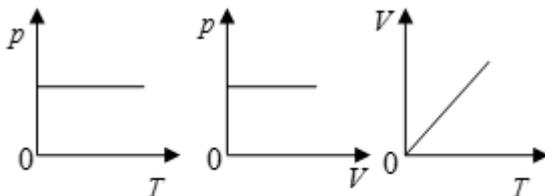


Рис. 2

3. Изохорным называется процесс, происходящий при постоянном объеме, т. е. $V = const$. Уравнение (1) при $V = const$ и $m = const$ имеет вид:

$$\frac{p}{T} = const \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Закон Шарля: для данной массы идеального газа при постоянном объеме давление прямо пропорционально абсолютной температуре.

Графики зависимости между параметрами состояния газа при $V = const$ представлены на рис. 3.

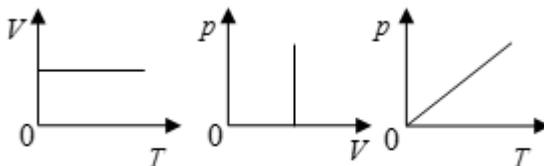


Рис. 3

Если в объеме V содержится N молекул, движущихся со скоростями v_1, v_2, \dots, v_N , то целесообразно рассматривать среднюю квадратичную скорость, характеризующую всю совокупность молекул газа:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{v_1^2 + \dots + v_N^2}{N}}.$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы идеального газа $\langle \varepsilon_0 \rangle$ может быть выражена формулами

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} \quad \text{и} \quad \langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{3}{2} kT,$$

где $k = \frac{R}{N_A} = \frac{8,31}{6,02 \cdot 10^{23}} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная

Больцмана; m_0 – масса молекулы.

Т. к. из выражения для $\langle \varepsilon_0 \rangle$ очевидно, что её величина зависит только от T , т. е. абсолютная температура есть мера средней кинетической энергии молекул.

Формулу для средней квадратичной скорости можно получить, приравняв выражения для $\langle \varepsilon_0 \rangle$:

$$\frac{m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad \Rightarrow \quad \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы

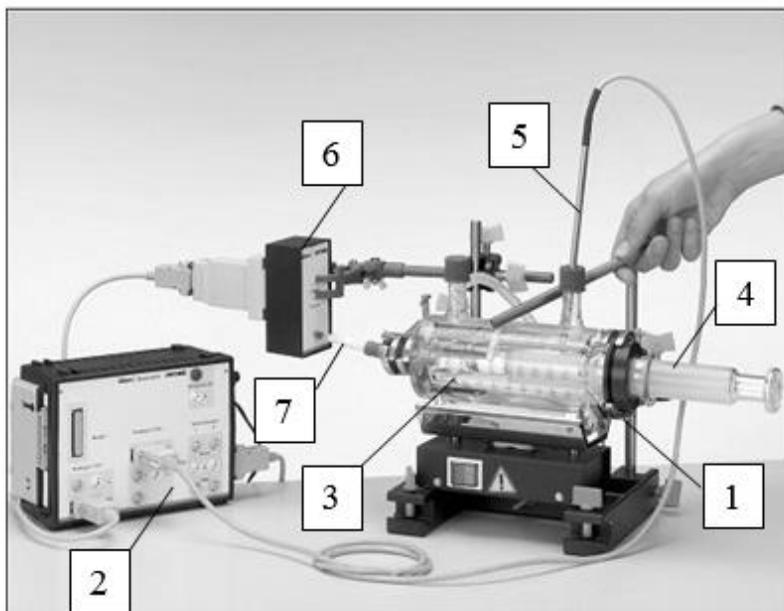


Рис. 4

В состав экспериментальной установки входят: экспериментальный модуль (1), персональный компьютер и блок «Кобра» (2) для сопряжения модуля с компьютером, т. е. вывода экспериментальных данных на экран компьютера. Основным элементом экспериментального модуля является стеклянный резервуар (3), состоящий из двух коаксиальных стеклянных цилиндров: внутреннего, заполненного изучаемым газом – воздухом, и внешнего, в котором находится вода. Объем газа во внутреннем цилиндре регулируется подвижным поршнем (4), перемещающимся внутри цилиндра. Объем воздуха определяется в миллилитрах по шкале, нанесенной на боковую поверхность внутреннего цилиндра. Температуру газа можно считать равной температуре воды во внешнем цилиндре, которая измеряется термометрическим датчиком – термопарой (5). Давление газа регистрируется датчиком (6), соединенным с внутренним цилиндром короткой трубкой (7). Данные с датчика давления и термопары через блок сопряжения «Кобра» (2) передаются на экран компьютера.

Молярная газовая постоянная может быть определена из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT \Rightarrow R = \frac{pVM}{mT}. \quad (3)$$

Соответствующие значения p , V и T определяются экспериментально на установке. Молярная масса воздуха $M = 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$. Массу воздуха, содержащегося внутри цилиндра, можно найти по формуле

$$m = \rho V. \quad (4)$$

Плотность воздуха ρ зависит от его давления и температуры. В справочных таблицах обычно приводится значение плотности $\rho_0 = 1,294 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ при нормальных условиях, т. е. при $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и $T_0 = 273 \text{ К}$.

Величину ρ можно найти из уравнения (2) с использованием соотношения (4):

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad pV = \frac{\rho \cdot V}{M} RT \Rightarrow \rho = \frac{pM}{RT}; \quad \rho_0 = \frac{p_0 M}{RT_0},$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{pT_0}{p_0 T} \Rightarrow \rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0 T}. \quad (5)$$

Подставив соотношение (5) в формулу (4), получим выражение для экспериментального определения массы воздуха:

$$m = \rho V = \frac{\rho_0 p T_0 V}{p_0 T} \quad (6)$$

Порядок выполнения работы

При выполнении эксперимента температура газа остается постоянной, т. е. осуществляется изотермический процесс.

Задание 1. Экспериментальная проверка закона Бойля-Мариотта

1. Подключить к сети персональный компьютер и блок питания установки «Кобра-3».

2. Перемещая поршень, т. е. изменяя объём воздуха в цилиндре, записать в табл. 1 соответствующие друг другу значения объёма V и давления p . Перемещение поршня осуществляется с определённым шагом и в определённых пределах по указанию преподавателя.

3. Записать в табл. 1 значение температуры T , при которой происходил изотермический процесс.

4. Отключить блок питания установки «Кобра-3» и персональный компьютер.

5. Используя данные табл. 1, построить изотерму – график зависимости $p = f(V)$ при $T = const$ и сделать вывод о соответствии графика закону Бойля-Мариотта.

Таблица 1

$M = 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}};$		$\rho_0 = 1,294 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$		$T = \text{K}$			
№	$V, \text{мл}$	p, hPa	$m, \text{кг}$	$R, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	$\Delta R, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	δR	δR_T
1						X	X
...							
10							
среднее							

$$1 \text{ мл} = 10^{-6} \text{ м}^3, \quad 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Па}$$

Задание 2. Определение молярной газовой постоянной

1. Используя данные таблицы 1, по формуле (6) и (3) вычислить значения массы воздуха, находящегося в сосуде, и молярной газовой постоянной для 3÷5 строк табл. 1 (по указанию преподавателя).

2. Найти среднее значение $\langle R \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i$,

абсолютные погрешности измерений $\Delta R_i = |\langle R \rangle - R_i|$,

среднюю абсолютную погрешность $\langle \Delta R \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta R_i$,

относительную погрешность $\delta R = \frac{\langle \Delta R \rangle}{\langle R \rangle}$.

3. Окончательный результат записать в виде:
 $R = \langle R \rangle \pm \langle \Delta R \rangle$.

7. Сравнить экспериментально полученное значение R с его теоретическим значением $R_T = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$:

$$\delta R_T = \frac{|\langle R \rangle - R_T|}{R_T}$$

Задание 3. Экспериментальное определение средней квадратичной скорости $\langle v_{кв} \rangle$, средней кинетической энергии теплового движения и числа молекул воздуха в сосуде

$$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3 \langle R \rangle T}{M}},$$

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{i}{2} kT = \frac{5 \langle R \rangle}{2 N_A} \cdot T,$$

где $i = 5$ – число степеней свободы молекул воздуха (как реального газа);

$$N = N_A \cdot \nu = N_A \cdot \frac{\langle m \rangle}{M}.$$

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой модель идеального газа?
2. Запишите уравнение Менделеева-Клапейрона.
3. Что такое изопроцессы?
4. Какой процесс называется изотермическим? Изобразите его графически. Запишите и сформулируйте закон Бойля-Мариотта.
5. Какой процесс называется изобарным? Изобразите его графически. Запишите и сформулируйте закон Гей-Люссака.
6. Какой процесс называется изохорным? Изобразите его графически. Запишите и сформулируйте закон Шарля.
7. В чём заключается физический смысл абсолютной температуры?
8. Что называется молярной массой?
9. Что такое моль вещества?
10. Что показывает число Авогадро?
11. Получите выражение для плотности газа ρ с использованием уравнения Менделеева-Клапейрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т. И. Трофимова, «Курс физики», – М: Академия, 2013 г.