

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ МАССЫ И ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА

Методические указания к лабораторной работе № 8 по курсу «Физика»
для студентов всех форм обучения всех направлений подготовки

Екатеринбург
УрФУ
2015

УДК 541.24.533.12.(075.8)

Составители: А. Н. Башкатов, В. П. Левченко, Н. Б. Пушкарева

Научный редактор – проф., д-р физ.- мат. наук А. А. Повзнер

Определение молярной массы и плотности воздуха: методические указания к лабораторной работе № 8 / сост. А. Н. Башкатов, В. П. Левченко, Н. Б. Пушкарева. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – 12 с.

В лабораторной работе № 8 рассматриваются свойства идеального газа, приводится уравнение состояния, параметры состояния, описываются приборы для измерения давления, температуры и массы газа. Дается порядок проведения экспериментов, формулы для вычисления искомых величин и погрешностей измерений.

Подготовлено кафедрой физики

ВВЕДЕНИЕ

Молярной массой называется масса одного моля вещества. В системе СИ эта величина измеряется в кг/моль. Моль является единицей измерения количества вещества, 1 моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (молекул, атомов и т. д.), сколько атомов содержится в изотопе углерода ^{12}C массой 0,012 кг. Число атомов в одном моле любого вещества составляет $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ (это постоянная Авогадро).

Используя уравнение состояния идеального газа, можно определить молярную массу газа. При не слишком высоких давлениях, но достаточно высоких температурах газ можно считать идеальным. Состояние такого газа описывается уравнением Менделеева–Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{M}RT, \quad (1)$$

где P – давление газа; V – объем газа; m – масса газа; M – молярная масса газа; $R = 8,3145$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура газа.

Из формулы (1) получаем выражение для молярной массы газа:

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

Следовательно, для вычисления M необходимо знать массу газа m , температуру T , давление газа P и занимаемый им объем V .

Если погрешности измерения P , V и T в каком-либо эксперименте не превышают 1 %, то определение массы газа m , находящегося в сосуде, с такой же точностью представляет сложную задачу (для этого необходимо было бы взвесить сосуд, наполненный газом, и совершенно пустой сосуд). Полное удаление газа из сосуда практически невозможно: даже лучшие современные насосы не позволяют откачивать газ до давления, меньшего,

чем 10^{-11} мм рт. ст., при этом в каждом кубическом сантиметре объема газа остается еще около 10^{11} молекул.

Существует иной способ определения M , при котором не нужно добиваться полного удаления газа из сосуда, а достаточно лишь несколько изменить его массу. Пусть в сосуде объемом V находится газ массой m_1 под давлением P_1 и при температуре T . Уравнение состояния (1) для этого газа примет вид

$$P_1 V = \frac{m_1}{M} RT. \quad (3)$$

Откачаем часть газа из сосуда, не изменяя его температуры (изотермически). После откачки масса газа в сосуде и его давление уменьшатся. Обозначим их соответственно m_2 и P_2 и вновь запишем уравнение состояния:

$$P_2 V = \frac{m_2}{M} RT. \quad (4)$$

Из уравнений (3) и (4) получаем

$$M = \frac{(m_1 - m_2) RT}{(P_1 - P_2) V}. \quad (5)$$

Это выражение позволяет определить M , если известно изменение массы газа (но не сама масса) и изменение давления, а также температура и объем газа.

В данной работе исследуемым газом является воздух, представляющий собой, как известно, смесь азота, кислорода, углекислого газа, аргона, паров воды и других газов. Формула (5) пригодна и для определения M смеси газов. В этом случае найденное значение M представляет собой некоторую среднюю или эффективную молярную массу смеси газов.

Молярная масса смеси газов может быть рассчитана и теоретически, если известны относительное содержание и молярная масса каждого из газов, входящих в смесь, по формуле

$$M_{\text{эфф}} = \frac{1}{\frac{m_1}{m} \frac{1}{M_1} + \frac{m_2}{m} \frac{1}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{m} \frac{1}{M_n}}, \quad (6)$$

где $\frac{m_1}{m}, \frac{m_2}{m}, \dots, \frac{m_n}{m}$ – относительные доли содержания каждого газа;

M_1, M_2, \dots, M_n – молярные массы газов, входящих в смесь.

Если известна молярная масса газа, то легко определить еще одну важную характеристику газа – его плотность. Плотность однородного вещества, в частности газа в небольших объемах, – это масса единицы объема газа

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (7)$$

Выразив из уравнения Менделеева–Клапейрона $\frac{m}{V}$, получим

$$\rho = \frac{PM}{RT}. \quad (8)$$

Формула (8) пригодна и для определения ρ смеси газов, если под M понимать эффективную молярную массу смеси.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Сосуд с исследуемым газом (воздухом) представляет собой стеклянную колбу C с краном K (рис. 1).

Для определения изменения массы газа ($m_1 - m_2$) колбу с воздухом сначала взвешивают на весах и определяют m_1 . (Перед взвешиванием кран K следует открыть, чтобы воздух в колбе находился при атмосферном давлении). После взвешивания колбу присоединяют к форвакуумному насосу. Включив насос (кран K открыт), откачивают воздух из колбы до минимально возможного давления, которое может дать этот насос. С

помощью вакуумметра B определяется разность давлений $(P_1 - P_2)$ между атмосферным P_1 и остаточным давлением P_2 в колбе.

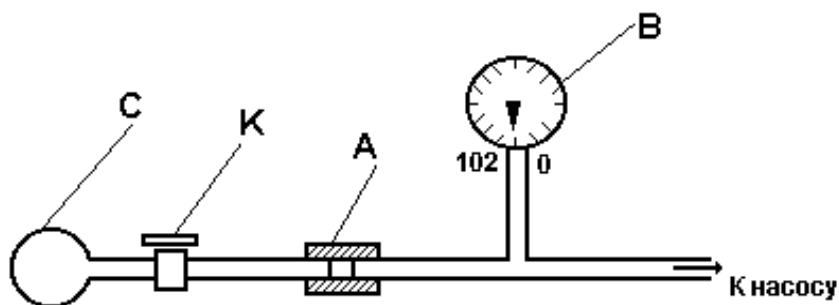


Рис. 1. Схема установки для откачки воздуха из колбы:

C – стеклянная колба; K – кран; A – резиновая трубка; B – вакуумметр

После откачки и отсчета разности давлений в колбе $(P_1 - P_2)$ (откачка воздуха в колбе производится преподавателем) колбу вновь взвешивают на весах, определяя ее массу m_2 вместе с оставшимся воздухом. Разность масс колбы до и после откачки дает то изменение массы газа в колбе $(m_1 - m_2)$, которое входит в расчетное уравнение (5). Температуру газа T принимают равной комнатной температуре, которую определяют по термометру.

Молярную массу воздуха вычисляют по формуле (5). Можно полагать, что систематические погрешности отдельных измерений в данной работе определяются, главным образом, пределами допускаемой основной погрешности средств измерения и погрешностями отсчитывания. Поскольку ошибка в оценке газовой постоянной существенно меньше остальных, ею можно пренебречь.

Плотность воздуха при комнатных P_1 , T рассчитывается по уравнению (8). При этом атмосферное давление P_1 отсчитывается по барометру.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что называется молем и молярной массой?
2. Вывести расчетную формулу для определения M .
3. В каком случае молярная масса будет больше: при опыте с чистым кислородом или со смесью газов (воздухом)?
4. Как можно оценить массу воздуха, удаленного из колбы?
5. Как определить остаточное давление воздуха в колбе, если с помощью вакуумметра определена разность давлений $(P_1 - P_2)$?
6. Как определяется плотность воздуха в данной работе?
7. Значительно ли будут отличаться полученные результаты для M , если откачку воздуха из колбы произвести, например, до 300 Па или $3 \cdot 10^{-4}$ Па?
8. Найти концентрацию молекул газа при 27°C и давлении 1 мм рт. ст.
(ответ: $n = 3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$).
9. Какова разница в массе воздуха, занимающего помещение в 50 м^3 , зимой и летом, если летом температура помещения достигает 40°C , а зимой -0°C . Считать давление постоянным, равным 1 атм (ответ: $\Delta m = 8 \text{ кг}$).
10. Найти эффективную молярную массу воздуха, рассматривая его как смесь азота (80 %) и кислорода (20 %). Процентное содержание дано по массе (ответ: $M_{\text{эфф}} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$).

ПРИЛОЖЕНИЕ

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе №8

«Определение молярной массы и плотности воздуха»

Студент(ка)_____

Группа_____

Преподаватель_____

Дата_____

1. Расчетные формулы:

$$M = \frac{(m_1 - m_2) RT}{(P_1 - P_2) V}, \quad \rho = \frac{P_1 M}{RT},$$

где M – _____;

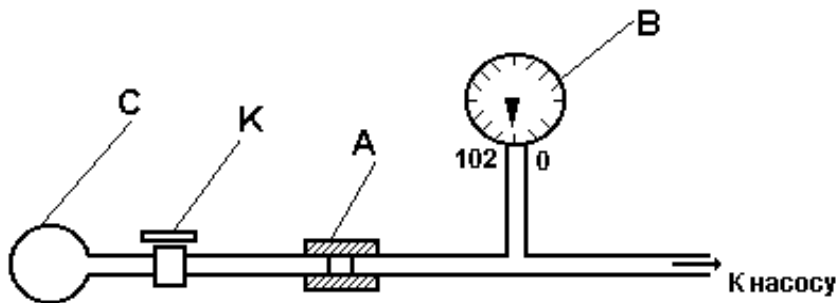
m_1, P_1 – _____;

m_2, P_2 – _____;

V – _____; T – _____;

ρ – _____.

2. Эскиз установки.



C – _____;

K – _____;

A – _____;

B – _____;

3. Средства измерений и их характеристики.

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления шкалы	Предел основной погрешности $\theta_{\text{осн}}$
Весы электронные цифровые			
Вакуумметр образцовый			
Барометр ртутный чашечный			
Термометр ртутный			
Стеклоянная колба № _____ (указать объем)			

4. Результаты измерений:

Масса колбы, г		Атмосферное давление P_1 , гПа или мм рт.ст.	Разность давлений $(P_1 - P_2)$, усл. ед.	Температура T , К
до откачки, m_1	после откачки, m_2			

1 усл. ед. давления равна ... Па.

5. Расчет M и ρ :

5.1. Вычисление молярной массы воздуха:

$$M = \frac{(m_1 - m_2) RT}{(P_1 - P_2) V} = \text{_____} = \text{кг/моль.}$$

5.2. Вычисление плотности воздуха

$$\rho = \frac{P_1 M}{RT} = \text{_____} = \text{кг/м}^3.$$

6. Расчет погрешностей измерений:

6.1. Вычисление границ неисключенных систематических погрешностей отдельных измерений:

$$\Delta_{m1} = \theta_{m1} = 1,1\sqrt{\theta_{\text{осн}}^2 + \theta_{\text{отс}}^2} = 1,1\sqrt{\text{_____}} = \text{г,}$$

$$\Delta_{m1} = \Delta_{m2} = \text{г,}$$

$$\Delta_{(P_1 - P_2)} = \theta_{(P_1 - P_2)} = 1,1\sqrt{\theta_{\text{осн}}^2 + \theta_{\text{отс}}^2} = 1,1\sqrt{\text{_____}} = \text{усл. ед.,}$$

$$\Delta_T = \theta_T = 1,1\sqrt{\theta_{\text{осн}}^2 + \theta_{\text{отс}}^2} = 1,1\sqrt{\text{_____}} = \text{К, (! } \Delta_T(\text{К}) = \Delta_t(\text{°C})\text{)}$$

$$\Delta_V = \theta_V = \theta_{\text{осн}} = 3 \text{ см}^3,$$

$$\Delta_{P_1} = \theta_{P_1} = 1,1\sqrt{\theta_{\text{осн}}^2 + \theta_{\text{отс}}^2} = 1,1\sqrt{\text{_____}} = \text{гПа.}$$

6.2. Вычисление границы относительной погрешности результата измерения молярной массы воздуха

$$\gamma_M = \frac{\Delta_M}{\langle M \rangle} = \sqrt{2 \left(\frac{\Delta_{m1}}{m_1 - m_2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_{(P_1 - P_2)}}{P_1 - P_2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_T}{T} \right)^2}$$

$$\gamma_M = \sqrt{\hspace{15em}} =$$

6.3. Вычисление границы абсолютной погрешности результата измерения молярной массы:

$$\Delta_M = \gamma_M M = \quad \text{кг/моль}, \quad P = 0,95.$$

6.4. Вычисление границы относительной погрешности результата измерения плотности:

$$\gamma_\rho = \frac{\Delta_\rho}{\langle \rho \rangle} = \sqrt{2 \left(\frac{\Delta_{P_1}}{P_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_M}{M} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_T}{T} \right)^2}$$

$$\gamma_\rho = \sqrt{\hspace{15em}} =$$

6.5. Вычисление границы абсолютной погрешности результата измерения плотности:

$$\Delta_\rho = \gamma_\rho \rho = \quad \text{кг/м}^3; \quad P = 0,95.$$

7. Окончательные результаты

$$M = (M \pm \Delta_M) = (\dots \pm \dots) \quad \text{кг/моль}, \quad P = 0,95.$$

$$\rho = (\rho \pm \Delta_\rho) = (\dots \pm \dots) \quad \text{кг/м}^3, \quad P = 0,95.$$

8. Выводы.

Учебное издание

Определение молярной массы и плотности воздуха

Составители: **Башкатов** Алексей Николаевич
Левченко Виталий Петрович
Пушкарева Надежда Борисовна

Редактор *В.О. Корионова*

Компьютерный набор *Н. Н. Суслиной*

Подписано в печать Формат 60×90 1/16.

Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 0,44. Тираж 100 экз. Заказ _____ .

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфического центре УрФУ
620075, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
E-mail.: press.info@usu.ru