

4. Определите число молекул идеального газа, находящегося в сосуде вместимостью $V = 1,4$ л, если температура газа $t = 27$ °С, а давление $p = 3,0$ кПа.

5. Водород, абсолютная температура которого $T = 290$ К, а масса $m = 2,0$ кг, находится в сосуде вместимостью $V = 2,0$ м³. Определите давление водорода.

6. Температура воздуха, находящегося в сосуде, $t_1 = 24,0$ °С. На сколько градусов увеличилась температура воздуха, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул увеличилась в $\alpha = 2,00$ раза?

7. Определите плотность азота, давление которого $p = 1,1 \cdot 10^5$ Па и абсолютная температура $T = 298$ К.



§ 5. Уравнение состояния идеального газа

Выясним, как связаны между собой макроскопические параметры идеального газа, которые характеризуют его равновесное состояние: давление, масса всего газа, объём, предоставленный ему, и температура.

Состояние макроскопической системы полностью определено, если известны её макроскопические параметры — давление p , масса m , температура T и объём V . Уравнение, связывающее параметры данного состояния, называют *уравнением состояния системы*. Изменение параметров состояния системы с течением времени называют *процессом*.

Если при переходе идеального газа из одного состояния в другое число его молекул $N = \frac{m}{M} N_A$ остаётся постоянным, т. е. масса и молярная масса газа не изменяются, то из уравнений $p = nkT$ и $n = \frac{N}{V}$ следует:

$$p_1 V_1 = NkT_1, \quad p_2 V_2 = NkT_2, \quad (5.1)$$

где k — постоянная Больцмана; p_1, V_1, T_1 — параметры начального состояния газа, а p_2, V_2, T_2 — конечного. Из соотношений (5.1) следует, что

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2},$$

или

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (5.2)$$

При неизменных массе и молярной массе идеального газа отношение произведения его давления и объёма к абсолютной температуре является величиной постоянной.

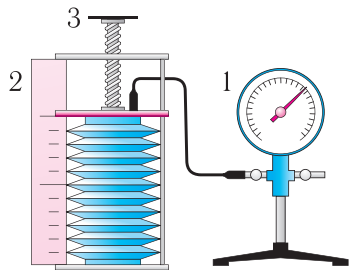


Рис. 18

Манометром *1*, соединённым с герметичным гофрированным сосудом, регистрируют давление газа внутри сосуда. Объём газа в сосуде можно рассчитать, используя линейку *2*. Температура газа в сосуде равна температуре окружающей среды и может быть измерена термометром.

Измерив параметры газа p_1 , V_1 , T_1 в начальном состоянии, вычисляют отношение $\frac{p_1 V_1}{T_1}$. Затем помещают сосуд в горячую воду. При этом температура газа и его давление изменяются. Вращая винт *3*, изменяют вместимость сосуда. Измерив снова давление газа p_2 и температуру T_2 , а также рассчитав предоставленный ему объём V_2 , вычисляют отношение $\frac{p_2 V_2}{T_2}$. Как показывают расчёты, уравнение состояния (5.2) выполняется в пределах погрешности эксперимента.

Уравнение состояния (5.2) можно применять для газов при следующих условиях:

1) не очень большие давления (пока собственный объём всех молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с предоставленным ему объёмом);

2) не слишком низкие или же высокие температуры (пока абсолютное значение потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия пренебрежимо мало по сравнению с кинетической энергией теплового движения молекул).

От теории к практике

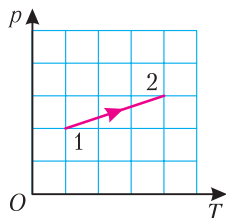


Рис. 19

На рисунке 19 представлен график процесса перехода идеального газа данной массы из состояния *1* в состояние *2*. Как изменился объём газа в результате этого процесса?

Поскольку число частиц $N = \frac{m}{M} N_A$, то из уравнения (5.1) следует:

$$pV = kN_A \frac{m}{M} T. \quad (5.3)$$

Величину, равную произведению постоянной Больцмана k и постоянной Авогадро N_A , назвали *универсальной газовой постоянной* R :

$$R = kN_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}. \quad (5.4)$$

С учётом выражения (5.4) уравнение (5.3) примет вид:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (5.5)$$

Поскольку количество вещества $\nu = \frac{m}{M}$, то формулу (5.5) можно записать в виде:

$$pV = \nu RT.$$

Уравнение состояния в виде (5.5) впервые получил русский учёный Д. И. Менделеев (1834–1907) в 1874 г., поэтому его называют *уравнением Клапейрона–Менделеева*.

Отметим, что уравнение Клапейрона–Менделеева связывает между собой макроскопические параметры конкретного состояния идеального газа. Используя уравнение Клапейрона–Менделеева, можно описать различные процессы, происходящие в идеальном газе.

Давление смеси газов. В повседневной жизни часто приходится иметь дело не с газом, состоящим из одинаковых молекул, а со смесью нескольких различных газов, не вступающих в химические реакции при рассматриваемых условиях. Например, воздух в комнате является смесью азота, кислорода, инертных газов и водорода, а также некоторых других газов.

Вследствие теплового движения частиц каждого газа, входящего в состав газовой смеси, они равномерно распределяются по всему предоставленному смеси объёму. Столкновения частиц обеспечивают в смеси тепловое равновесие.

Каждый газ вносит свой вклад в суммарное давление, производимое газовой смесью, создавая давление, называемое *парциальным*.

Парциальное давление — давление газа, входящего в состав газовой смеси, если бы он один занимал весь объём, предоставленный смеси, при той же температуре.

Смесь идеальных газов принимают за идеальный газ.



Из истории физики

Фундаментальные исследования газовых смесей провёл английский учёный Джон Дальтон (1766–1844). Им сформулирован закон независимости парциальных давлений компонентов смеси (1801–1802). В 1802 г. на несколько месяцев раньше французского учёного Жозефа Гей-Люссака (1778–1850) Дальтон установил закон теплового расширения газов, а также ввёл понятие атомного веса.



При постоянных массе и молярной массе отношение произведения давления идеального газа и его объёма к абсолютной температуре является величиной постоянной (уравнение состояния идеального газа):

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \quad pV = \frac{m}{M}RT.$$

Парциальное давление — давление газа, входящего в состав газовой смеси, если бы он один занимал весь объём, предоставленный смеси, при той же температуре.



1. Что называют уравнением состояния идеального газа?
2. Как связаны параметры идеального газа в уравнении состояния?
3. Какое давление называют парциальным?



Пример решения задачи

Баллон с газом, давление которого $p_1 = 2,84$ МПа, находился в неотапливаемом помещении, где температура воздуха $t_1 = 7$ °С. После того как некоторое количество газа было израсходовано, баллон внесли в помещение, где температура воздуха $t_2 = 27$ °С. Определите, какая часть газа была израсходована, если после длительного пребывания баллона в отапливаемом помещении давление газа в нём стало $p_2 = 1,52$ МПа.

Дано:

$$p_1 = 2,84 \text{ МПа} =$$

$$= 2,84 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$T_1 = 280 \text{ К},$$

$$T_2 = 300 \text{ К}$$

$$p_2 = 1,52 \text{ МПа} =$$

$$= 1,52 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} \text{ — ?}$$

Решение. Если пренебречь тепловым расширением баллона, то его вместимость не изменяется. Запишем уравнение Клапейрона–Менделеева для начального и конечного состояний газа, считая его идеальным:

$$p_1V = \frac{m_1}{M}RT_1, \quad p_2V = \frac{m_2}{M}RT_2,$$

откуда

$$m_1 = \frac{p_1VM}{RT_1}, \quad m_2 = \frac{p_2VM}{RT_2}.$$

Тогда

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = \frac{VM \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right)}{\frac{VMp_1}{RT_1}} = 1 - \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}.$$

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = 1 - \frac{1,52 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 280 \text{ К}}{2,84 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 300 \text{ К}} = 0,50.$$

Ответ: $\frac{m_1 - m_2}{m_1} = 0,50.$



Упражнение 4

1. Определите количество вещества идеального газа, находящегося в сосуде вместимостью $V = 480 \text{ см}^3$ при нормальных условиях (атмосферное давление $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура $t_0 = 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$).

2. На рисунке 20 представлен график зависимости давления водорода, масса которого $m = 100 \text{ г}$, от абсолютной температуры. Определите объём, занимаемый газом.

3. Баллон вместимостью $V_1 = 15 \text{ л}$, содержащий газ, давление которого $p_1 = 2,0 \cdot 10^6 \text{ Па}$, соединили с пустым баллоном вместимостью $V_2 = 5,0 \text{ л}$. Определите давление газа, которое установилось в баллонах, если температура после расширения газа через некоторый промежуток времени оказалась такой же, как и до расширения.

4. Азот, объём которого $V_1 = 2,9 \text{ м}^3$, температура $T_1 = 293 \text{ К}$ и давление $p_1 = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, перевели в жидкое состояние. Определите объём, занимаемый жидким азотом, если его плотность $\rho = 0,86 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

5. На рисунке 21 точки 1 и 2 соответствуют различным состояниям идеального газа определённой массы. Определите, во сколько раз отличаются давления газа в состояниях 1 и 2.

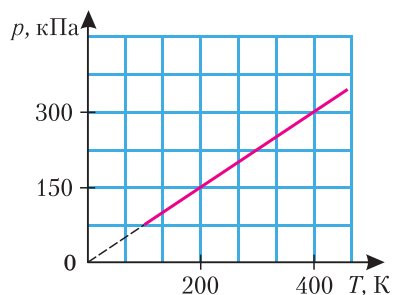


Рис. 20

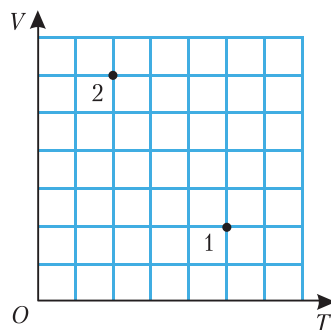


Рис. 21

