

же при всех температурах от 0 до 100°C. Определите объем цилиндра. Температурные коэффициенты линейного расширения стекла и объемного расширения ртути соответственно равны $9 \cdot 10^{-6}$ и $1,8 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$.

8.12. Стеклянный сосуд весит P_0 . Этот же сосуд, наполненный ртутью, при 0°C весит P_1 . Если сосуд нагреть до температуры t , то часть ртути выливается и вес сосуда с ртутью оказывается равным P_2 . Чему равен температурный коэффициент объемного расширения стекла? Температурный коэффициент объемного расширения ртути β ?

8.13. В наполненном сосуде содержится керосин массой M_k и кусок железа массой $M_{ж}$. Если всей системе сообщить количество теплоты Q , то из сосуда будет выливаться керосин объемом V . Определите температурный коэффициент объемного расширения железа. Теплоемкостью и расширением сосуда пренебречь. Работой расширения пренебречь.

8.14. Стальной брусок плавает в сосуде со ртутью в вертикальном положении. При температуре 0°C в ртуть погружена 0,577 часть всего объема бруска. На сколько изменится погруженная часть объема бруска, если систему нагреть до 100°C? Температурные коэффициенты линейного расширения стали и объемного расширения ртути соответственно равны $1,1 \cdot 10^{-5}$ и $1,8 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$.

8.15. Вес куска металла, погруженного в известную жидкость, уменьшается на P_1 при температуре t_1 и на P_2 при температуре t_2 по сравнению с его весом в воздухе. Определите температурный коэффициент линейного расширения металла.

8.16. Стальной шарик массой $m = 100$ г опущен на нити в керосин. На сколько изменится натяжение нити, если всю систему нагреть от $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = 50^\circ\text{C}$? Плотности стали и керосина при 0°C равны $\rho_{ст} = 7,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{ок} = 800 \text{ кг/м}^3$. Температурные коэффициенты линейного расширения стали и объемного расширения керосина соответственно равны $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$, $\beta = 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

8.17. Два кубика массами m_1 и m_2 стоят на теплопроводящей подставке. На сколько изменится общая теплоемкость кубиков, если один из них положить на другой? Первый кубик железный, второй — медный.

Глава 9

ГАЗЫ

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

1. Состояние тел характеризуют совокупностью нескольких физических величин, называемых параметрами состояния. Важнейшими параметрами состояния газа являются его объем V , давление p и температура T .

Состояние газа, при котором все его параметры при неизменных внешних условиях остаются постоянными сколь угодно долго, называют равновесным. Процессы, состоящие из непрерывной последовательности равновесных состояний, называют равновесными. Параметры состояния газа, находящегося в равновесном состоянии, связаны между собой уравнением состояния $f(p, V, T) = 0$.

Самый простой вид уравнение состояния имеет для идеальных газов. Идеальными называют газы, молекулы которых взаимодействуют друг с другом лишь при соударениях (отсутствует межмолекулярное притяжение и отталкивание) и объем молекул ничтожно мал по сравнению с объемом, занимаемым газом. Кроме того, предполагается, что соударение молекул происходит по законам абсолютно упругого удара. Реальные газы тем точнее подчиняются законам идеальных газов, чем меньше их давление и выше температура.

2. Для идеальных газов имеют место следующие экспериментальные законы.

Закон Бойля — Мариотта:

$$pV = \text{const} \text{ при } T = \text{const} \text{ и } m = \text{const}. \quad (9.1)$$

Из этого закона вытекает, что для двух произвольных состояний газа при указанных условиях справедливо равенство

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (9.1')$$

Закон Гей-Люссака:

$$\beta_V = \frac{V - V_0}{V_0 t} = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}, \text{ или } \frac{V}{T} = \text{const}, \quad (9.2)$$

если

$$p = \text{const} \text{ и } m = \text{const}.$$

Согласно выражению (9.2) при соблюдении указанных ограничений для двух произвольных состояний

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}. \quad (9.2')$$

Закон Шарля:

$$\beta_p = \frac{p - p_0}{p_0 t} = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}, \text{ или } \frac{p}{T} = \text{const}, \quad (9.3)$$

если

$$V = \text{const} \text{ и } m = \text{const}.$$

Согласно закону Шарля для двух произвольных состояний

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \quad (9.3')$$

Соотношения (9.1), (9.2) и (9.3) можно рассматривать как уравнения состояния идеального газа соответственно при изо-

термическом, изобарическом и изохорическом процессах, когда из трех параметров газа изменяются два.

3. Из опытных законов (любых двух) для идеальных газов вытекает объединенный газовый закон (уравнение Клапейрона):

$$\frac{pV}{T} = \text{const, если } m = \text{const,} \quad (9.4)$$

откуда следует, что при переходе газа из одного состояния в другое, когда меняются все три его параметра, должно быть:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (9.4')$$

4. Масса микрочастиц (молекул, атомов, нуклонов, электронов и т. д.) измеряется в килограммах и атомных единицах массы (а. е. м.). За атомную единицу массы принята $\frac{1}{12}$ массы самого легкого изотопа углерода: $1 \text{ а. е. м.} = 1,660531 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. В молекулярной физике и термодинамике вместо массы часто используется количество вещества, выраженное в молях. Моль — это количество вещества, в котором содержится столько же структурных элементов (молекул, атомов, ионов или других микрочастиц), сколько атомов находится в углероде-12 массой 0,012 кг. 1 моль любого вещества (элемента) содержит одинаковое число молекул (атомов), равное $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$. Это число называется постоянной Авогадро. Согласно закону Авогадро 1 моль идеального газа занимает при нормальных условиях ($p_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $T_0 = 273 \text{ К}$) объем $V_m = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$.

Если масса одной структурной частицы вещества (молекулы, атома, иона и т. д.) равна m_1 , то масса моля M (молярная масса) этого вещества равна

$$M = m_1 N_A.$$

Если тело массой m состоит из вещества с молярной массой M и в нем находится N молекул, то это тело содержит число молей ν , равное

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}. \quad (9.5)$$

Относительной молекулярной (атомной) массой M_r данного вещества (элемента) называется отношение массы молекулы (атома) этого вещества m_1 к $\frac{1}{12}$ массы m_C атома самого легкого изотопа углерода: $M_r = m_1 / \left(\frac{1}{12} m_C \right)$.

По определению $m_C N_A = 12 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$, следовательно, $M = M_r \cdot 10^{-3}$, где M — молярная масса вещества, $\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$; M_r — относительная молекулярная масса этого вещества.

При нормальных условиях объем идеального газа равен:

$$V_0 = \nu V_m. \quad (9.6)$$

Если в сосуде находится смесь нескольких газов, не вступающих друг с другом в химические реакции, давление смеси газов равно сумме давлений, производимых каждым газом в отдельности, как если бы он один занимал весь сосуд (закон Дальтона):

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i.$$

Если за первое состояние принять состояние идеального газа с параметрами p, V, T , а за второе — его состояние при нормальных условиях, то согласно уравнению (9.4')

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}$$

Отсюда с учетом соотношений (9.6) и (9.5)

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 \nu V_m}{T_0} = \frac{m}{M} \bar{R} = \frac{N}{N_A} R,$$

или

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT = \frac{N}{N_A} RT, \quad (9.7)$$

где величина $R = \frac{p_0 V_m}{T_0}$ имеет для всех идеальных газов одинаковое значение и называется молярной газовой постоянной. Числовое значение газовой постоянной равно:

$$R = \frac{1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}}{273 \text{ К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Уравнение состояния идеального газа (9.7) называют уравнением Менделеева — Клапейрона. Его можно представить в виде:

$$p = \frac{\rho}{M} RT,$$

где ρ — плотность газа при данной температуре T , а также

$$p = zkT$$

($z = \frac{N}{V}$ — концентрация молекул; $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана).

5. Если температура идеального газа массой m изменяется на ΔT , внутренняя энергия газа изменяется на величину

$$\Delta U = c_V m \Delta T = C_{mV} \nu \Delta T, \quad (9.8)$$

где c_v — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме и C_{mv} — молярная теплоемкость газа при постоянном объеме — теплоемкость, рассчитанная на моль газа.

Если при постоянном давлении p газ нагревается от температуры T_1 до температуры T_2 , то его объем возрастает от V_1 до V_2 и газ совершает работу

$$A = p(V_2 - V_1) = p\Delta V. \quad (9.9)$$

Применяя уравнение Менделеева — Клапейрона (9.7) для каждого из двух состояний газа, формулу работы можно представить в виде:

$$A = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1) = \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (9.10)$$

Если в процессе расширения к газу подводится некоторое количество теплоты Q , то согласно закону сохранения и преобразования энергии для изобарического процесса

$$Q = \Delta U + A = c_v m \Delta T + \left\{ \frac{p\Delta V}{\frac{m}{M} R \Delta T} \right\}. \quad (9.11)$$

Согласно (9.8) и (9.10)

$$\Delta U = \frac{c_v M}{R} A = \frac{C_{mV}}{R} A. \quad (9.12)$$

Поэтому на основании (9.11) можно записать:

$$Q = \frac{C_{mV} + R}{C_{mV}} \Delta U = \frac{C_{mV} + R}{R} A. \quad (9.13)$$

6. Коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, равен:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (9.14)$$

где Q_1 и Q_2 — соответственно количество теплоты, полученное от нагревателя и отданное холодильнику; T_1 и T_2 — температура нагревателя и холодильника.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ. ПРИМЕРЫ

1. Основным уравнением, характеризующим состояние идеального газа, является уравнение Менделеева — Клапейрона. Составив это уравнение для каждого из рассматриваемых состояний газа и записав дополнительные условия в виде формул, можно сравнительно легко решить почти любую задачу. Однако этот метод в ряде случаев усложняет решение и приводит к