

## ГЛАВА 1. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Для характеристики масс атомов и молекул пользуются относительной атомной массой элемента и относительной молекулярной массой вещества.

Относительной атомной массой  $A_r$  химического элемента называют отношение массы атома  $m_0$  этого элемента к  $1/12$  массы атома углерода  $m_{0C}$ :

$$A_r = \frac{m_0}{m_{0C}/12}.$$

Относительной молекулярной массой  $M_r$  вещества называют отношение массы молекулы этого вещества к  $1/12$  массы атома углерода:

$$M_r = \frac{m_0}{m_{0C}/12}.$$

Единица массы, равная  $1/12$  массы атома углерода, называется атомной единицей массы (а. е. м.). Атомная единица массы:

$$m_{\text{а.е.м.}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Количеством вещества  $\nu$  называется отношение количества молекул  $N$  в данном теле к количеству атомов в  $0,012$  кг углерода  $^{12}_6\text{C}$  ( $N_A$ ):

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

Количество вещества, в котором число частиц (атомов или молекул) равно числу атомов в  $0,012$  кг углерода, называется *молем*. Количество атомов или молекул  $N_A$ , содержащихся в 1 моль вещества, равно *постоянной Авогадро*:

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Массу 1 моль вещества называют *молярной массой*  $M$ . Молярная масса равна произведению массы молекулы  $m_0$  на постоянную Авогадро:

$$M = m_0 N_A.$$

Для определения молярной массы вещества используют следующее соотношение:  $M = M_r \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

Количество вещества может быть определено по формуле:

$$\nu = \frac{m}{M}, \text{ где } m \text{ — масса вещества.}$$

*Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа*  $p = \frac{1}{3} m_0 n \langle v^2 \rangle$ , или  $p = \frac{2}{3} n \langle E \rangle$ , где  $p$  — давление газа,  $n$  — концентрация молекул,  $m_0$  — масса молекулы газа,  $\langle v^2 \rangle$  — *средний квадрат скорости движения молекул*,  $\langle E \rangle$  — *средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы*.

*Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы:*

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT,$$

где  $k$  — *постоянная Больцмана*,  $T$  — *термодинамическая температура*.

Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры:

$$p = nkT.$$

Уравнение состояния для произвольной массы идеального газа:

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

где  $V$  — *объем газа*,  $R$  — *универсальная (молярная) газовая постоянная*.

Уравнение состояния идеального газа при его переходе из одного состояния в другое, если масса газа постоянна:

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

Закон Бойля — Мариотта ( $m = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$  — изотермический процесс):

$$pV = \text{const}.$$

Для любых двух состояний газа при изотермическом процессе:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Закон Гей-Люссака ( $m = \text{const}$ ,  $p = \text{const}$  — изобарический процесс):

$$\frac{V}{T} = \text{const}.$$

Для любых двух состояний газа при изобарическом процессе:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

Закон Шарля ( $m = \text{const}$ ,  $V = \text{const}$  — изохорический процесс):

$$\frac{p}{T} = \text{const}.$$

Для любых двух состояний газа при изохорическом процессе:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$

Давление смеси газов, которые химически не взаимодействуют (закон Дальтона):

$$p = \sum_{i=1}^n p_i,$$

где  $p_i$  — парциальные давления газов, составляющих смесь.

Средняя квадратичная, средняя арифметическая и наиболее вероятная скорости молекул газа:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, \quad v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}.$$

## 1.1. Основные положения молекулярно-кинетической теории газов

**Пример 1.1.** Вода массой 100 г, которая находилась в стакане, полностью испарилась за 10 суток. Определите среднее количество молекул воды, вылетающих каждую секунду с ее поверхности.

Дано:  $m = 0,1$  кг,  $t = 24 \cdot 3,6 \cdot 10^4$  с  
 $\langle n \rangle$  — ?

**Решение:** Количество молекул воды, которое находилось в стакане и превратилось в пар, определим по формуле:  $N = \frac{m}{M} N_A$ , где

$M = 18 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярная масса воды.

Среднее количество молекул, вылетающих с поверхности воды каждую секунду, определяется:

$$\langle n \rangle = \frac{N}{t} = \frac{mN_A}{Mt}$$

Числовое значение:

$$\langle n \rangle = \frac{0,1 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{18 \cdot 10^{-3} \cdot 24 \cdot 3,6 \cdot 10^4} = 4 \cdot 10^{16} \text{ (с}^{-1}\text{)}$$

**Пример 1.2.** В баллоне вместимостью 10 л находится газ при температуре 27 °С. Из-за утечки газа давление в баллоне понизилось на 4,2 кПа. Сколько молекул газа покинуло баллон?

Дано:  $V = 10^{-2}$  м<sup>3</sup>,  $T = 300$  К,  $\Delta p = 4,2 \cdot 10^3$  Па,  $T = \text{const}$   
 $\Delta N$  — ?

**Решение:** Используя зависимость давления газа от концентрации и температуры  $p_1 = n_1 kT = \frac{N_1}{V} kT$ , определим первоначальное

количество молекул в баллоне:  $N_1 = \frac{p_1 V}{kT}$ , где  $p_1$  — первоначальное

давление газа в баллоне. Аналогичным образом найдем количество молекул, оставшихся в баллоне:  $N_2 = \frac{p_2 V}{kT}$ , где  $p_2$  — конечное давление.

Количество молекул, покинувших баллон, определится следующим образом:  $\Delta N = \frac{\Delta p V}{kT}$ , где  $\Delta p = p_1 - p_2$ .

$$\text{Числовое значение: } \Delta N = \frac{4,2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-2}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 10^{22}.$$

**Пример 1.3.** В сосуде объемом 3 дм<sup>3</sup> находится  $5 \cdot 10^{24}$  молекул водорода при давлении 2 МПа. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул водорода.

$$\text{Дано: } V = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, N = 5 \cdot 10^{24}, p = 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$$
$$\langle E \rangle = ?$$

**Решение:** Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре:

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

Для нахождения произведения  $kT$  используем уравнение:

$$p = nkT. \text{ Откуда } kT = \frac{p}{n}.$$

С учетом полученных соотношений средняя кинетическая энергия определится:  $\langle E \rangle = \frac{3}{2} \frac{p}{n}$ .

Концентрацию молекул водорода выразим следующим образом:

$$n = \frac{N}{V}. \text{ Тогда окончательное выражение для } \langle E \rangle:$$

$$\langle E \rangle = \frac{3pV}{2N}.$$

Числовое значение:  $\langle E \rangle = \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 5 \cdot 10^{24}} = 1,8 \cdot 10^{-21}$  (Дж).

1.1. Объясните, почему, когда пишут мелом по классной доске, то на ней остаются частицы мела?

1.2. Из сырого дерева выточили два шара. Поверхность одного из них покрыли спиртовым лаком. Почему шар, поверхность которого не покрыли лаком, через некоторое время растрескался? Что можно сказать о состоянии поверхности шара, покрытого лаком?

1.3. Почему броуновское движение в жидкостях и газах является хаотическим? Что представляют собой отрезки ломаных линий на рисунках, отражающих броуновское движение?

1.4. Капля масла объемом  $0,003 \text{ мм}^3$  растеклась по поверхности воды тонким слоем, площадь которого равна  $300 \text{ см}^2$ . Приняв толщину слоя равной диаметру молекулы масла, определите этот диаметр.

1.5. Рассчитайте объем атома алюминия.

1.6. Во сколько раз объем атомов серебра больше объема атомов железа?

1.7. Какое количество атомов находится в 1 г золота?

1.8. На изделие, поверхность которого  $20 \text{ см}^2$ , нанесен слой серебра толщиной 1 мкм. Сколько атомов серебра в покрытии?

1.9. Масса атома некоторого химического элемента равна  $3,52 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$ . Какой это элемент?

1.10. Определите среднюю квадратичную скорость движения молекул гелия при нормальных условиях.

1.11. При каком давлении находится азот, если средняя квадратичная скорость его молекул равна  $500 \text{ м/с}$ , а плотность —  $1,35 \text{ кг/м}^3$ ?

1.12. Определите среднюю арифметическую скорость молекул идеального газа, плотность которого при давлении  $35 \text{ кПа}$  равна  $0,3 \text{ кг/м}^3$ .

1.13. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа при нормальных условиях равна  $480 \text{ м/с}$ . Определите число молекул в 1 г этого газа?

1.14. Плотность газа в баллоне газонаполненной электрической лампы в рабочем режиме равна  $0,9 \text{ кг/м}^3$  при давлении  $1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

Определите среднюю квадратичную скорость молекул газа при этих условиях.

1.15. При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул кислорода достигает 600 м/с?

1.16. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекулы азота при температуре 300 К.

1.17. Определите концентрацию молекул кислорода и его плотность при давлении 5 нПа и температуре 20 °С.

1.18. Плотность некоторого газа при температуре 14 °С и давлении  $4 \cdot 10^5$  Па равна 0,68 кг/м<sup>3</sup>. Определите молярную массу этого газа.

1.19. Плотность газа равна 30 г/м<sup>3</sup>. Найдите давление, которое оказывает газ на стенки сосуда, если средняя квадратичная скорость молекул газа равна 500 м/с.

1.20. Докажите, что средняя квадратичная скорость молекул газа равна  $\sqrt{3p/\rho}$ , где  $p$  — давление газа, а  $\rho$  — его плотность.

1.21. В сосуде объемом 0,2 дм<sup>3</sup> находится газ при температуре 30 °С. На сколько понизится давление в сосуде, если в результате утечки из него вышли  $10^{20}$  молекул газа? Температуру газа считать постоянной.

1.22. Современная техника позволяет достигать значений остаточного давления  $\sim 1$  пПа. Сколько молекул газа остается при таком вакууме в 1 см<sup>3</sup> при температуре 300 К?

1.23. Молекулярный пучок падает на неподвижную стенку под углом  $\alpha$  к ее нормали. Концентрация молекул в пучке  $n$ , масса каждой молекулы  $m_0$ , скорость молекул  $v$ . Молекулы отражаются от стенки по закону абсолютно упругого удара. Определите давление, которое испытывает стенка.

1.24. Сосуд объемом 1 л полностью заполнен водой при температуре 27 °С. Определите, какое давление установилось бы внутри сосуда, если бы силы взаимодействия между молекулами воды неожиданно исчезли.

1.25. Какой скоростью обладали атомы паров серебра в опыте Штерна, если частота вращения прибора 3000 мин<sup>-1</sup>, а сдвиг полосы серебра при температуре 1173 К был равен 9,5 мм. Диаметры внутренних и внешних цилиндров соответственно равны 12 и 240 мм.