

Глава II МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

§ 5. Физические основы молекулярно-кинетической теории и термодинамики

В условиях задач этого раздела температура задается в градусах Цельсия. При проведении числовых расчетов необходимо перевести температуру в градусы Кельвина, исходя из того, что $0^\circ \text{C} = 273^\circ \text{K}$. Кроме того, необходимо также представить все остальные величины в единицах системы СИ. Так, например, $1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3$; $1 \text{ м}^3 = 10^6 \text{ см}^3 = 10^9 \text{ мм}^3$. Если в задаче приведена графическая зависимость нескольких величин от какой-либо одной и при этом все кривые изображены на одном графике, то по оси y задаются условные единицы. При решении задач используются данные таблиц 3,6 и таблиц 9—11 из приложения.

5.1. Какую температуру T имеет масса $m = 2 \text{ г}$ азота, занимающего объем $V = 820 \text{ см}^3$ при давлении $p = 0,2 \text{ МПа}$?

Решение:

Температуру азота можно определить из уравнения

Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$, откуда

температура азота $T = \frac{pV\mu}{mR}$. Молярная масса азота

$\mu = 0,028 \text{ кг/моль}$. Подставляя числовые данные, получим

$$T = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 820 \cdot 10^{-6} \cdot 0,028}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31} = 280 \text{ К или } T = 7^\circ \text{C}.$$

5.2. Какой объем V занимает масса $m = 10 \text{ г}$ кислорода при давлении $p = 100 \text{ кПа}$ и температуре $t = 20^\circ \text{C}$?

Решение:

Выразим объем кислорода из уравнения Менделеева —

Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$, откуда $V = \frac{mRT}{\mu p}$. Молярная

масса кислорода $\mu = 0,032$ кг/моль. Подставляя числовые

данные, получим $V = \frac{10^{-2} \cdot 8,31 \cdot 293}{0,032 \cdot 10^5} = 7,6 \cdot 10^{-3}$ м³.

5.3. Баллон объемом $V = 12$ л наполнен азотом при давлении $p = 8,1$ МПа и температуре $t = 17^\circ\text{C}$. Какая масса m азота находится в баллоне?

Решение:

Массу азота можно выразить из уравнения Менделеева —

Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$, откуда $m = \frac{pV\mu}{RT}$. Молярная

масса азота $\mu = 0,028$ кг/моль. $m = 1,13$ кг.

5.4. Давление воздуха внутри плотно закупоренной бутылки при температуре $t_1 = 7^\circ\text{C}$ было $p_1 = 100$ кПа. При нагревании бутылки пробка вылетела. До какой температуры t_2 нагрели бутылку, если известно, что пробка вылетела при давлении воздуха в бутылке $p = 130$ кПа?

Решение:

По закону Шарля $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$, отсюда $T_2 = \frac{p_2 T_1}{p_1}$; $T_1 = 280$ К,

$p_1 = 10^5$ Па; $T_2 = 364$ К.

5.5. Каким должен быть наименьшей объем V баллона, вмещающего массу $m = 6,4$ кг кислорода, если его стенки при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ выдерживают давлéние $p = 15,7$ МПа?

Решение:

Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu}RT$, откуда $V = \frac{mRT}{\mu p}$. Молярная масса кислорода $\mu = 0,032$ кг/моль, $T = 293$ К. Тогда $V = 31$ л.

5.6. В баллоне находилась масса $m_1 = 10$ кг газа при давлении $p_1 = 10$ МПа. Какую массу Δm газа взяли из баллона, если давление стало равным $p_2 = 2,5$ МПа? Температуру газа считать постоянной.

Решение:

Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона для первого состояния $\frac{p_1 V_1}{T} = \frac{m_1}{\mu} R$ — (1), для второго

состояния $\frac{p_2 V_2}{T} = \frac{m_2}{\mu} R$ — (2). Разделив (1) на (2), получим

$\frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{m_1}{m_2}$. Поскольку объем баллона не изменяется, то

$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1}{m_2}$ или $\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1}{m_1 + \Delta m}$; $\frac{\Delta m}{m_1} = \frac{p_1 - p_2}{p_1}$, откуда

$\Delta m = \frac{m_1(p_1 - p_2)}{p_1}$; $\Delta m = 7,5$ кг.

5.7. Найти массу m сернистого газа (SO_2), занимающего объем $V = 25$ л при температуре $t = 27^\circ \text{C}$ и давлении $p = 100$ кПа.

Решение:

Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu}RT$, откуда $m = \frac{pV\mu}{RT}$; $T = 300$ К; $V = 25 \cdot 10^{-3}$ м³. Мо-

лярную массу данного вещества можно определить по формуле $\mu = M_r k$ — (1), где M_r — относительная молекулярная масса вещества; $k = 10^{-3}$ кг/моль. Относительную молекулярную массу найдем из соотношения $M_r = \sum n_i A_{r,i}$, — (2), где n_i — число атомов i -го химического элемента, входящих в молекулу данного вещества; $A_{r,i}$ — относительная атомная масса i -го химического элемента. В нашем случае для сернистого газа формула (2) примет вид $M_r = n_s A_{r,s} + n_o A_{r,o}$, где $n_s = 1$ (число атомов серы в молекуле сернистого газа); $n_o = 2$ (число атомов кислорода в той же формуле); $A_{r,s}$ и $A_{r,o}$ — относительные атомные массы серы и кислорода. По таблице Д. И. Менделеева найдем $A_{r,s} = 32$, $A_{r,o} = 16$. После подстановки в формулу (3) значений n_s , n_o , $A_{r,s}$ и $A_{r,o}$ получим $M_r = 1 \cdot 32 + 2 \cdot 16 = 64$. Подставив это значение относительной молекулярной массы, а также значение k в формулу (1), найдем молярную массу сернистого газа: $\mu = 64 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Тогда $m = 65$ г.

5.8. Найти массу m воздуха, заполняющего аудиторию высотой $h = 5$ м и площадью пола $S = 200$ м². Давление воздуха $p = 100$ кПа, температура помещения $t = 17^\circ$ С. Молярная масса воздуха $\mu = 0,029$ кг/моль.

Решение:

Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$, откуда $m = \frac{pV\mu}{RT}$. Объем комнаты $V = hS$. Тогда

масса воздуха $m = \frac{phS\mu}{RT}$; $T = 290$ К; $m = 1,2$ т.

5.9. Во сколько раз плотность воздуха ρ_1 , заполняющего помещение зимой ($t_1 = 7^\circ \text{C}$), больше его плотности ρ_2 летом ($t_2 = 37^\circ \text{C}$)? Давление газа считать постоянным.

Решение:

Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона для первого состояния $\frac{pV_1}{T_1} = \frac{m}{\mu}R$ — (1), для второго

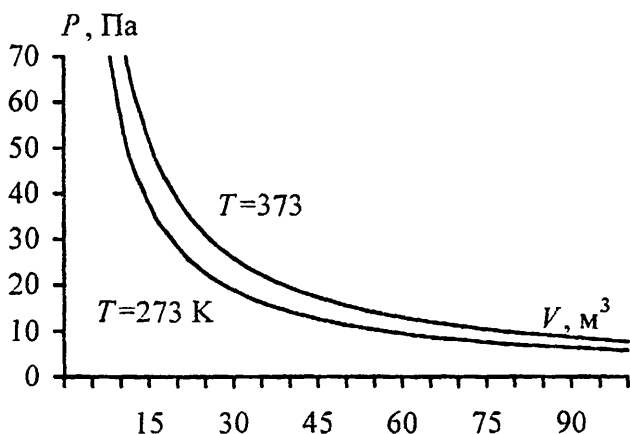
состояния $\frac{pV_2}{T_2} = \frac{m}{\mu}R$ — (2). Разделив (1) на (2), при

$p = \text{const}$ имеем $\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{m/\rho_1}{m/\rho_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$, откуда $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}$,

где $T_1 = 280 \text{ K}$; $T_2 = 310 \text{ K}$. Тогда $\rho_1 / \rho_2 = 1,1$.

5.10. Начертить изотермы массы $m = 0,5 \text{ г}$ водорода для температур: а) $t_1 = 0^\circ \text{C}$; б) $t_2 = 100^\circ \text{C}$.

Решение:

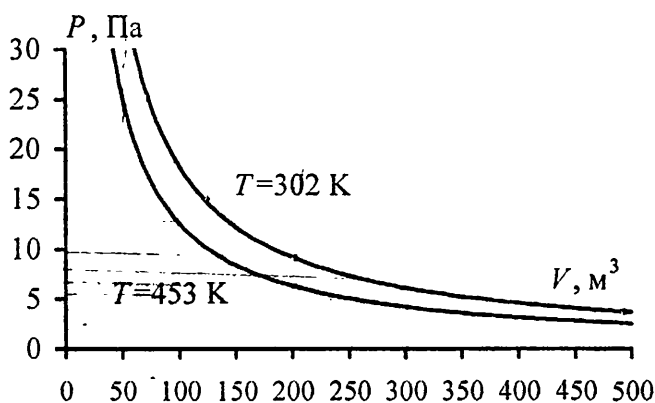


а) Из уравнения Менделеева — Клапейрона найдем $pV = \frac{m}{\mu}RT_1$; $pV = 567 \text{ Дж}$. Зависимость давления p от объема V выражается соотношением $p = 567/V$.

б) Из уравнения Менделеева — Клапейрона найдем $pV = \frac{m}{\mu}RT_2$; $pV = 775$ Дж. Зависимость давления p от объема V выражается соотношением $p = \frac{775}{V}$.

5.11. Начертить изотермы массы $m = 15,5$ г кислорода для температур: а) $t_1 = 39^\circ \text{C}$; б) $t_2 = 180^\circ \text{C}$.

Решение:



а) Из уравнения Менделеева — Клапейрона найдем $pV = (m/\mu)RT_1$; $pV = 1255$ Дж. Зависимость давления p от объема V выражается соотношением $p = 1255/V$.

б) Из уравнения Менделеева — Клапейрона найдем $pV = (m/\mu)RT_2$; $pV = 1823$ Дж. Зависимость давления p от объема V выражается соотношением $p = 1823/V$.

5.12. Какое количество ν газа находится в баллоне объемом $V = 10$ м³ при давлении $p = 96$ кПа и температуре $t = 17^\circ \text{C}$?

Решение:

Число молей газа определяется следующим соотношением

$\nu = \frac{m}{\mu}$. Тогда уравнение Менделеева — Клапейрона мож-

но записать в виде $pV = \frac{m}{\mu}RT = \nu RT$, откуда $\nu = \frac{pV}{RT}$.

Здесь $T = 290$ К. $\nu = 0,4$ кмоль.

5.13. Массу $m = 5$ г азота, находящегося в закрытом сосуде объемом $V = 4$ л при температуре $t_1 = 20^\circ$ С, нагревают до температуры $t_2 = 40^\circ$ С. Найти давление p_1 и p_2 газа до и после нагревания.

Решение:

Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu}RT$. По условию $m = const$, тогда для первого состоя-

ния $p_1V_1 = \frac{m}{\mu}RT_1$, для второго состояния $p_2V_2 = \frac{m}{\mu}RT_2$,

откуда $p_1 = \frac{mRT_1}{\mu V}$; $p_2 = \frac{mRT_2}{\mu V}$. Подставляя числовые данные, получим $p_1 = 108$ кПа; $p_2 = 116$ кПа.

5.14. Посередине откачанного и запаянного с обеих концов капилляра, расположенного горизонтально, находится столбик ртути длиной $l = 20$ см. Если капилляр поставить вертикально, то столбик ртути переместится на $\Delta l = 10$ см. До какого давления p_0 был откачан капилляр? Длина капилляра $L = 1$ м.

Решение:

Объем воздуха с каждой стороны от столбика ртути при горизонтальном положении капилляра: $V_0 = Sh$, где

S — площадь поперечного сечения капилляра,

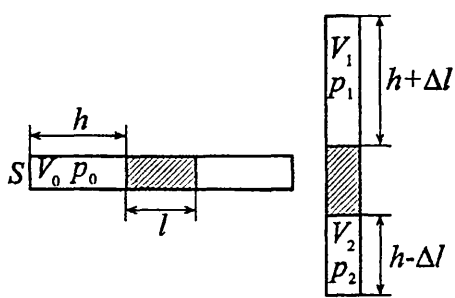
$$h = \frac{L-l}{2} = 0,4 \text{ м.}$$

Давление в этом положении равно p_0 . При вертикальном положении капилляра объем воздуха в его верхней части $V_1 = S(h + \Delta l)$, давление равно p_1 . Т. к.

$T = \text{const}$, то по закону Бойля — Мариотта $V_0 p_0 = V_1 p_1$ или $h p_0 = p_1 (h + \Delta l)$ — (1). Давление p_2 в нижней части капилляра складывается из давления воздуха p_1 и давления столбика ртути p . Тогда для нижней части капилляра $h p_0 = (p_1 + p)(h - \Delta l)$ — (2). Решая совместно

уравнения (1) и (2), найдем
$$p_0 = \frac{p(h - \Delta l)(h + \Delta l)}{2h\Delta l}$$
.

В условиях данной задачи $p = 200 \text{ мм рт. ст.} = 26,6 \text{ кПа}$. Отсюда $p_0 = 50 \text{ кПа}$.



5.15. Общеизвестен шуточный вопрос: «Что тяжелее: тонна свинца или тонна пробки?» На сколько истинный вес пробки, которая в воздухе весит 9,8кН, больше истинного веса свинца, который в воздухе весит также 9,8кН? Температура воздуха $t = 17^\circ \text{C}$, давление $p = 100 \text{ кПа}$.

Решение:

На тела, находящиеся в воздухе, действует выталкивающая сила Архимеда $F_A = \rho g V$, где ρ — плотность воздуха, V — объем тела. Т.е. тело теряет в весе столько, сколько весит воздух в объеме данного тела. Объем свинца $V_1 = m / \rho_1$. Воздух в данном объеме весит $m_1 g$. Согласно

уравнению Менделеева — Клапейрона $pV_1 = \frac{m_1}{\mu} RT$, откуда

да $m_1 = \frac{\mu p V_1}{RT}$. Тогда $m_1 g = \frac{\mu p g V_1}{RT} = \frac{\mu p m g}{\rho_1 RT}$. Объем пробки

$V_2 = \frac{m}{\rho_2}$. Вес воздуха в данном объеме $m_2 g = \frac{\mu p m g}{\rho_2 RT}$. Ис-

тинный вес свинца $P_1 = g(m + m_1)$, истинный вес пробки

$P_2 = g(m + m_2)$. Тогда $\Delta P = g(m_2 - m_1) = \frac{\mu p m g}{RT} \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \right)$;

$\Delta P = 58,6 \text{ Н}$.

5.16. Каков должен быть вес p оболочки детского воздушного шарика, наполненного водородом, чтобы результирующая подъемная сила шарика $F = 0$, т.е. чтобы шарик находился во взвешенном состоянии? Воздух и водород находится при нормальных условиях. Давление внутри шарика равно внешнему давлению. Радиус шарика $r = 12,5 \text{ см}$.

Решение:

Результирующая подъемная сила $F = m_1 g - (m_2 g + P)$, где m_1 — масса воздуха в объеме шарика, m_2 — масса водорода в объеме шарика. Так как $F = 0$, то $P = g(m_1 - m_2)$. Из уравнения Менделеева — Клапейрона найдем $m = \frac{\mu p V}{RT}$.

Тогда $P = g \frac{pV}{RT} (\mu_1 - \mu_2) = \frac{4\pi r^3 p g}{3RT} (\mu_1 - \mu_2)$; $P = 96 \text{ мН}$.

5.17. При температуре $t = 50^\circ \text{ С}$ давление насыщенного водяного пара $p = 12,3 \text{ кПа}$. Найти плотность ρ водяного пара.

Решение:

Плотность вещества определяется соотношением $\rho = \frac{m}{V}$.

Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$, откуда $m = \frac{pV\mu}{RT}$. Тогда плотность водяного пара

$$\rho = \frac{p\mu}{RT}; \quad \rho = 0,083 \text{ кг/м}^3.$$

5.18. Найти плотность ρ водорода при температуре $t = 10^\circ \text{C}$ и давлении $p = 97,3 \text{ кПа}$.

Решение:

$T = 288 \text{ К}$. Плотность вещества определяется соотношением $\rho = \frac{m}{V}$. Согласно уравнению Менделеева — Клапей-

рона $pV = \frac{m}{\mu} RT$, откуда $m = \frac{pV\mu}{RT}$. Тогда плотность водо-

рода $\rho = \frac{p\mu}{RT}$; $\rho = 0,081 \text{ кг/м}^3$.

5.19. Некоторый газ при температуре $t = 10^\circ \text{C}$ и давлении $p = 200 \text{ кПа}$ имеет плотность $\rho = 0,34 \text{ кг/м}^3$. Найти молярную массу μ газа.

Решение:

$T = 283 \text{ К}$. Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$, откуда $\mu = \frac{mRT}{pV}$. Но $\frac{m}{V} = \rho$, отсюда

$$\mu = \frac{\rho RT}{p}; \quad \mu = 0,004 \text{ кг/моль}.$$

5.20. Сосуд откачан до давления $p = 1,33 \cdot 10^{-9}$ Па; температура воздуха $t = 15^\circ \text{C}$. Найти плотность ρ воздуха в сосуде.

Решение:

$T = 288 \text{ К}$. Плотность вещества определяется соотношением $\rho = \frac{m}{V}$. Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$, откуда $m = \frac{pV\mu}{RT}$. Тогда плотность воздуха $\rho = \frac{p\mu}{RT}$; $\rho = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ кг/м}^3$.

5.21. Масса $m = 12 \text{ г}$ газа занимает объем $V = 4 \text{ л}$ при температуре $t_1 = 7^\circ \text{C}$. После нагревания газа при постоянном давлении его плотность стала равной $\rho = 0,6 \text{ кг/м}^3$. До какой температуры t_2 нагрели газ?

Решение:

Запишем уравнение состояния газа до и после нагревания

$$pV_1 = \frac{m}{\mu} RT_1 \quad \text{— (1);} \quad pV_2 = \frac{m}{\mu} RT_2 \quad \text{— (2).}$$
 Поскольку

$$V_2 = \frac{m}{\rho_2}, \text{ то (2) можно переписать: } \frac{p}{\rho_2} = \frac{RT_2}{\mu}, \text{ откуда}$$

$$T_2 = \frac{p\mu}{\rho_2 R} \quad \text{— (3). Давление } p \text{ найдем из (1): } p = \frac{mRT_1}{\mu V_1}.$$

Подставив данное выражение в (3), получим $T_2 = \frac{mT_1}{V_1\rho_2}$;

$$T_2 = 1400 \text{ К.}$$

5.22. Масса $m = 10 \text{ г}$ кислорода находится при давлении $p = 304 \text{ кПа}$ и температуре $t_1 = 10^\circ \text{C}$. После расширения вследствие нагревания при постоянном давлении кислород занял объ-

ем $V_2 = 10$ л. Найти объем V_1 газа до расширения, температуру t_2 газа после расширения, плотности ρ_1 и ρ_2 газа до и после расширения.

Решение:

Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона уравнение состояния газа до нагревания $p_1 V_1 = \frac{m}{\mu} R T_1$; после на-

гревания $p_2 V_2 = \frac{m}{\mu} R T_2$. По условию $p_1 = p_2 = p$, отсюда

$$V_1 = \frac{m R T_1}{\mu p}, \quad V_1 = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad \rho_1 = \frac{\mu p}{R T_1}, \quad \rho_1 = 4,14 \text{ кг/м}^3;$$

$$T_2 = \frac{\mu p V_2}{m R}, \quad T_2 = 1170 \text{ К}; \quad \rho_2 = \frac{\mu p}{R T_2}, \quad \rho_2 = 1 \text{ кг/м}^3.$$

5.23. В запаянном сосуде находится вода, занимающая объем, равный половине объема сосуда. Найти давление p и плотность ρ водяного пара при температуре $t = 400^\circ \text{ С}$, зная, что при этой температуре вся вода обращается в пар.

Решение:

В начальном состоянии плотность воды $\rho_1 = m / V_1$. После нагревания $\rho_2 = \frac{m}{V_2}$. По условию $V_2 = 2V_1$, тогда $\rho_2 = \frac{1}{2} \rho_1$; $\rho_2 = 500 \text{ кг/м}^3$. Запишем уравнение состояния водяного

пара при $T = 673 \text{ К}$: $p_2 V_2 = \frac{m}{\mu} R T$ или $2 p_2 V_1 = \frac{m}{\mu} R T$.

Поскольку $V_1 = \frac{m}{\rho_1}$, то $p_2 = \frac{\rho_1 R T}{2 \mu}$; $p_2 = 155 \text{ МПа}$.

5.24. Построить график зависимости плотности ρ кислорода: а) от давления p при температуре $T = \text{const} = 390 \text{ К}$ в интервале

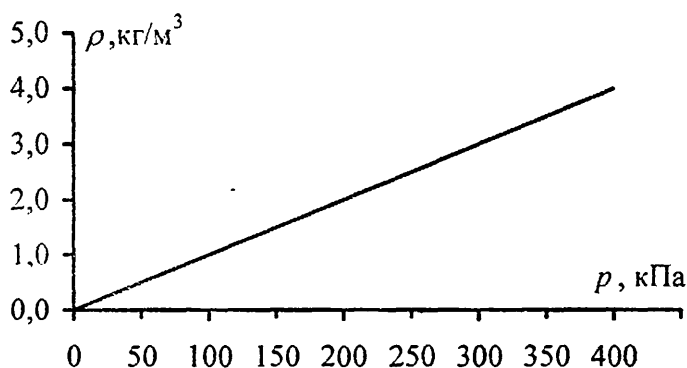
0 ≤ p ≤ 400 кПа через каждые 50 кПа; б) от температуры T при p = const = 400 кПа в интервале 200 ≤ T ≤ 300 К через каждые 20К.

Решение:

Воспользуемся формулой, полученной в задаче 5.17:

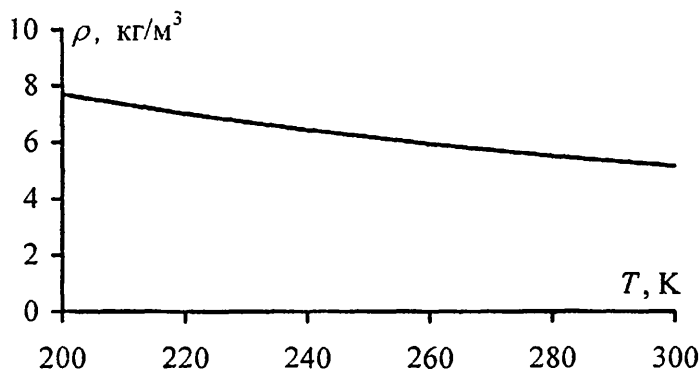
$$\rho = \frac{p\mu}{RT}. \text{ Молярная масса кислорода } \mu = 0,032 \text{ кг/моль.}$$

а) При T = const = 390 К: $\rho \approx 10^{-5} \cdot p$;



p, кПа	0	50	100	150	200	250	300	350	400
ρ, кг/м³	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4

б) При p = const = 400 кПа: $\rho = 1540 / T$.



T, К	200	220	240	260	280	300
ρ, кг/м³	7,70	7,00	6,42	5,92	5,50	5,13

5.25. В закрытом сосуде объемом $V = 1 \text{ м}^3$ находится масса $m_1 = 1,6 \text{ кг}$ кислорода и масса $m_2 = 0,9 \text{ кг}$ воды. Найти давление p в сосуде при температуре $t = 500^\circ \text{ С}$, зная, что при этой температуре вся вода превращается в пар.

Решение:

По закону Дальтона $p = p_1 + p_2$, где, согласно уравнению

Менделеева — Клапейрона, $p_1 = \frac{m_1 RT}{\mu_1 V}$ — парциальное

давление кислорода $\mu_1 = 0,032 \text{ кг/моль}$, $p_2 = \frac{m_2 RT}{\mu_2 V}$ — пар-

циальное давление водяного пара $\mu_2 = 0,018 \text{ кг/моль}$. От-

сюда $p = \frac{RT}{V} \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right)$; $p = 640 \text{ кПа}$.

5.26. В сосуде 1 объем $V_1 = 3 \text{ л}$ находится газ под давлением $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$. В сосуде 2 объем $V_2 = 4 \text{ л}$ находится тот же газ под давлением $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Температуры газа в обоих сосудах одинаковы. Под каким давлением p будет находиться газ, если соединить сосуды 1 и 2 трубкой?

Решение:

По закону Дальтона $p = p'_1 + p'_2$, где p'_1 и p'_2 — парци-

альные давления газа после соединения сосудов. По закону

Бойля — Мариотта $p'_1(V_1 + V_2) = p_1 V_1$; $p'_2(V_1 + V_2) = p_2 V_2$

отсюда $p'_1 = \frac{p_1 V_1}{V_1 + V_2}$; $p'_2 = \frac{p_2 V_2}{V_1 + V_2}$; $p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}$.

5.27. В сосуде объемом $V = 2 \text{ л}$ находится масса $m_1 = 6 \text{ г}$ углекислого газа (CO_2) и масса m_2 закиси азота (N_2O) при температуре $t = 127^\circ \text{ С}$. Найти давление p смеси в сосуде.

Решение:

По закону Дальтона $P = P_1 + P_2$, где, согласно уравнению Менделеева — Клапейрона, $P_1 = \frac{m_1 RT}{\mu_1 V}$ — парциальное давление углекислого газа ($\mu_1 = 0,044$ кг/моль), $P_2 = \frac{m_2 RT}{\mu_2 V}$ — парциальное давление закиси азота ($\mu_2 = 0,044$ кг/моль). Отсюда $P = \frac{RT}{V} \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right)$; $P = 415$ кПа.

5.28. В сосуде находится масса $m_1 = 14$ г азота и масса $m_2 = 9$ г водорода при температуре $t = 10^\circ\text{C}$ и давлении $p = 1$ МПа. Найти молярную массу μ смеси и объем V сосуда.

Решение:

Молярная масса смеси μ есть отношение массы смеси m к количеству вещества смеси ν , т.е. $\mu = \frac{m}{\nu}$ — (1). Масса смеси равна сумме масс компонентов смеси $m = m_1 + m_2$. Количество вещества смеси равно сумме количеств вещества компонентов. Подставив в формулу (1) выражения m и ν , получим $\mu = \frac{m_1 + m_2}{m_1 / \mu_1 + m_2 / \mu_2}$ — (2).

Далее, применив способ использованный в задаче 5.7, найдем молярные массы μ_1 азота и μ_2 водорода: $\mu_1 = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $\mu_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Подставим значение величин в (2) и произведем вычисления:

$$\mu = \frac{14 \cdot 10^{-3} + 9 \cdot 10^{-3}}{\frac{14 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 10^{-3}} + \frac{9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}}} = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Запишем уравне-

ние состояния смеси газов: $pV = \frac{m_1 + m_2}{\mu} RT$. Отсюда

$$\text{найдем } V = \frac{m_1 + m_2}{\mu p} RT; V = 11,7 \text{ л.}$$

5.29. Закрытый сосуд объемом $V = 2$ л наполнен воздухом при нормальных условиях. В сосуд вводится диэтиловый эфир ($C_2H_5OC_2H_5$). После того как весь эфир испарился, давление в сосуде стало равным $p = 0,14$ МПа. Какая масса m эфира была введена в сосуд?

Решение:

Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона, в начальный момент, когда сосуд был заполнен воздухом,

$$p_1 V = \frac{m_b}{\mu_b} RT. \text{ Когда в сосуд ввели диэтиловый эфир,}$$

$$pV = \left(\frac{m_b}{\mu_b} + \frac{m}{\mu} \right) RT = \frac{m_b}{\mu_b} RT + \frac{m}{\mu} RT = p_1 V + \frac{m}{\mu} RT, \text{ откуда}$$

$$\frac{m}{\mu} RT = pV - p_1 V = (p - p_1) V; m = \frac{(p - p_1) \cdot V \mu}{RT}. \text{ Молярная}$$

масса диэтилового эфира ($C_2H_5OC_2H_5$) — $\mu = 74 \times 10^{-3}$ кг/моль (см. задачу 5.7), соответственно $m = 2,5$ г.

5.30. В сосуде объемом $V = 0,5$ л находится масса $m = 1$ г парообразного йода (I_2). При температуре $t = 1000^\circ C$ давление в сосуде $p_c = 93,3$ кПа. Найти степень диссоциации α молекул йода на атомы. Молярная масса молекул йода $\mu = 0,254$ кг/моль.

Решение:

Степенью диссоциации α называют отношение числа молекул, распавшихся на атомы, к общему числу молекул

газа, т.е. степень диссоциации показывает, какая часть молекул распалась на атомы. В результате диссоциации мы имеем $\nu_1 = \frac{2\alpha m}{\mu}$ атомарного йода и $\nu_2 = \frac{(1-\alpha) \cdot m}{\mu}$

молекулярного йода. Их парциальные давления:

$$p_1 = \frac{2\alpha mRT}{\mu V} \quad (1); \quad p_2 = \frac{(1-\alpha) \cdot mRT}{\mu V} \quad (2).$$

По закону Дальтона $p_c = p_1 + p_2$. Подставляя (1) и (2), получим

$$p_c = \frac{mRT}{\mu V} (1 + \alpha), \text{ откуда } \alpha = \frac{\mu p_c V}{mRT} - 1; \quad \alpha = 0,12.$$

5.31. В сосуде находится углекислый газ. При некоторой температуре степень диссоциации молекул углекислого газа на кислород и окись углерода $\alpha = 0,25$. Во сколько раз давление в сосуде при этих условиях будет больше того давления, которое имело бы место, если бы молекулы углекислого газа не были диссоциированы?

Решение:

Решение аналогично задаче 5.30: $\frac{p_c}{p} = 1 + \alpha; \quad \alpha = 0,25;$

$$\frac{p_c}{p} = 1,25.$$

5.32. В воздухе содержится 23,6% кислорода и 76,4% азота (по массе) при давлении $p = 100$ кПа и температуре $t = 13^\circ \text{C}$. Найти плотность ρ воздуха и парциальные давления p_1 и p_2 кислорода и азота.

Решение:

Рассмотрим некоторую массу m воздуха, занимающую объем V . Данный объем будет содержать массу $0,236m$

кислорода и $0,764m$ азота. Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu}RT$, где μ — молярная масса воздуха. Разделив на V , получим $p = \frac{\rho}{\mu}RT$, откуда плотность воздуха $\rho = \frac{\mu p}{RT}$; $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$. Парциальное давление кислорода $p_1 = \frac{0,236m}{\mu_1 V}RT = \frac{0,236\rho}{\mu_1}RT$; $p_1 = 21 \text{ кПа}$. Парциальное давление азота $p_2 = \frac{0,764m}{\mu_2 V} \times RT = \frac{0,764\rho}{\mu_2}RT$; $p_2 = 79 \text{ кПа}$.

5.33. В сосуде находится масса $m_1 = 10 \text{ г}$ углекислого газа и масса $m_2 = 15 \text{ г}$ азота. Найти плотность ρ смеси при температуре $t = 27^\circ \text{С}$ и давлении $p = 150 \text{ кПа}$.

Решение:

По закону Дальтона давление смеси газов $p = p_1 + p_2$ — (1), где p_1 и p_2 парциальные давления углекислого газа и азота. Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $p_1 V = \frac{m_1}{\mu_1}RT$ — (2); $p_2 V = \frac{m_2}{\mu_2}RT$ — (3). Складывая (2) и (3), с учетом (1), получим: $pV = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right) \times RT$ — (4). Плотность смеси $\rho = \frac{m_1 + m_2}{V}$. Объем сосуда

V выразим из (4): $V = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right) \frac{RT}{p}$, тогда $\rho = \frac{p}{RT} \times$
 $\times \frac{(m_1 + m_2)}{(m_1 / \mu_1 + m_2 / \mu_2)}$; $\rho = 1,98 \text{ кг/м}^3$.

5.34. Найти массу m_0 атома: а) водорода; б) гелия.

Решение:

Масса молекулы равна отношению молярной массы к числу Авогадро: $m = \frac{\mu}{N_A}$. Поскольку молекула водорода

состоит из двух атомов, то масса одного атома $m_0 = \frac{\mu}{2N_A}$.

а) Масса атома водорода $m_0 = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. б) Масса атома гелия $m_0 = 6,65 \cdot 10^{-27}$ кг.

5.35. Молекула азота, летящая со скоростью $v = 600 \text{ м/с}$, упруго ударяется о стенку сосуда по нормали к ней. Найти импульс силы $F\Delta t$, полученный стенкой сосуда за время удара.

Решение:

Запишем второй закон Ньютона в виде $F = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$, отсюда

$F\Delta t = m\Delta v$ — (1). Поскольку удар был упругий и происходил по нормали к стенке, то скорость молекулы после удара равна по модулю скорости до удара и противоположна по направлению. Тогда $\Delta v = v - (-v) = 2v$ — (2).

Масса молекулы $m = \frac{\mu}{N_A}$ — (3), где μ — молярная масса

азота, N_A — число Авогадро. Подставив (2) и (3) в (1), получим $F\Delta t = \frac{2\mu v}{N_A}$; $F\Delta t = 5,6 \cdot 10^{-23}$ Н·с.

5.36. Молекула аргона, летящая со скоростью $v = 500$ м/с, упруго ударяется о стенку сосуда. Направление скорости молекулы и нормаль к стенке сосуда составляют угол $\alpha = 60^\circ$. Найти импульс силы $F\Delta t$, полученный стенкой сосуда за время удара.

Решение:

По второму закону Ньютона $F\Delta t = m\Delta v$. Считая положительным направление нормали, внешней к стенке, получим: $\Delta v = v_2 \cos \alpha - (-v_1 \cos \alpha) = v_2 \cos \alpha + v_1 \cos \alpha$. Таким образом, $F\Delta t = 2mv \cos \alpha$. Масса молекулы аргона $m = \frac{\mu}{N_A}$. Тогда $F\Delta t = \frac{2\mu v}{N_A} \cos \alpha$; $F\Delta t = 3,3 \cdot 10^{-23}$ Н·с.

5.37. Молекула азота летит со скоростью $v = 430$ м/с. Найти импульс mv этой молекулы.

Решение:

Импульс молекулы $\vec{p} = m\vec{v}$, где масса молекулы азота $m = \frac{\mu}{N_A}$. Отсюда $p = \frac{\mu v}{N_A}$; $p = mv = 2 \cdot 10^{-23}$ кг·м/с.

5.38. Какое число молекул n содержит единица массы водяного пара?

Решение:

Число молекул, содержащееся в некоторой массе вещества, можно найти из соотношения: $n = \nu \cdot N_A$, где ν —

количество молей в данной массе вещества;

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ — число Авогадро. $\nu = \frac{m}{\mu}$. Тогда,

при $m = 1$, для водяного пара $n = \frac{N_A}{\mu}$; $n = 3,3 \cdot 10^{25}$.

5.39. В сосуде объемом $V = 4$ л находится масса $m = 1$ г водорода. Какое число молекул n содержит единица объема сосуда?

Решение:

Число молекул водорода N , содержащееся во всем сосуде, можно найти из соотношения: $N = \frac{m}{\mu} N_A$.

Тогда число молекул в единице объема $n = N/V$ или $n = \frac{mN_A}{\mu V}$; $n = 7,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

5.40. Какое число молекул N находится в комнате объемом $V = 80 \text{ м}^3$ при температуре $t = 17^\circ \text{С}$ и давлении $p = 100 \text{ кПа}$?

Решение:

Число молекул N , находящихся в комнате, можно найти из соотношения: $N = \frac{m}{\mu} N_A$. Согласно уравнению Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{\mu} RT$, откуда $\frac{m}{\mu} = \frac{pV}{RT}$. Тогда

$N = \frac{pVN_A}{RT}$; $N = 2 \cdot 10^{27}$.