

## Газовые смеси

Если в сосуде находится смесь газов  $X, Y, Z, \dots$ , то *парциальным давлением*  $p_X$  газа  $X$  называется давление, которое было бы в этом сосуде, если бы он был заполнен только газом  $X$ . Оказывается, что давление  $p$  газовой смеси равно сумме парциальных давлений газов, входящих в состав этой смеси:  $p = p_X + p_Y + p_Z + \dots$  (закон Дальтона). Для смеси идеальных газов работает уравнение Менделеева — Клапейрона:  $pV = (\nu_X + \nu_Y + \nu_Z + \dots)RT$ .

Перед решением задач листка рекомендуется поработать с материалами из приведённого списка. В статьях, помеченных красным кружком, имеются упражнения (ответы — либо в конце документа, либо отдельной ссылкой), которые, разумеется, необходимо делать. Пустой кружок означает факультативный материал; его можно пропустить при первом знакомстве.

- С. Коршунов. Закон Дальтона. «Квант», 1981, №11. [[Ответы](#)]

Задачи МФТИ: полупроницаемая перегородка, диссоциация газа, радиоактивный распад трития. Упражнения.

- А. И. Черноуцан. Задачи на смешение идеальных газов. «Квант», 2008, №4.

Только газовые законы: соединение сосудов, частичная диссоциация, влажный воздух. Термодинамика: соединение теплоизолированных сосудов. Упражнения.

- А. В. Бялко. Что такое атмосфера. «Квант», 1983, №6.

**ЗАДАЧА 1.** (*МОШ, 2018, 11*) В сосуде под поршнем находится некоторая масса кислорода при температуре  $2T$ . В него закачивают ещё такую же массу водорода, а температуру понижают до  $T$ . Найдите, во сколько раз изменился объём содержимого под поршнем. Газы считать идеальными. Молярная масса кислорода 32 г/моль, водорода 2 г/моль.

$$\frac{8}{9} = \frac{\nu_1 \nu_2}{\nu_1 + \nu_2} = \frac{\nu_1}{\nu_2}$$

**ЗАДАЧА 2.** Найдите среднюю молярную массу и плотность смеси двух идеальных газов. Массы газов равны  $m_1$  и  $m_2$ , их молярные массы —  $\mu_1$  и  $\mu_2$ . Смесь находится при температуре  $T$ , давление смеси равно  $p$ .

$$\frac{\mu_1(\nu_1/\nu_2 + \nu_2/\nu_1)}{d(\nu_1 + \nu_2)} = d : \frac{\nu_1/\nu_2 + \nu_2/\nu_1}{\nu_1 + \nu_2} = \mu$$

**ЗАДАЧА 3.** В сосуде объёмом  $V$  находится  $\nu$  молей двухатомного газа. Сосуд нагрели до температуры  $T$ , при которой  $\alpha = 1/2$  часть молекул газа диссоциировала на атомы. Найдите давление в сосуде.

$$\frac{\mu \nu}{\mu \nu \alpha} = \frac{\mu}{\mu \alpha} (\nu + 1) = d$$

**ЗАДАЧА 4.** («Росатом», 2011, 11) В закрытом сосуде при температуре  $T$  находился кислород в количестве 2 моль, содержащий некоторое количество озона  $O_3$ . С течением времени озон полностью превратился в молекулярный кислород. Получившийся кислород оказывает то же самое давление, что и первоначальная смесь газов при температуре  $8T/9$ . Найти количество вещества (число молей) озона в сосуде в начальный момент времени.

$$\frac{8}{9} = \frac{\nu_1}{\nu_2}$$

ЗАДАЧА 5. (МФТИ, 1998) Чему равна масса  $m$  азота, который содержится в воздухе комнаты объёмом  $V = 75 \text{ м}^3$ ? Средняя квадратичная скорость молекул азота  $v = 500 \text{ м/с}$ . Считать, что воздух состоит из азота и кислорода. Концентрация молекул азота в  $\beta = 4$  раза больше концентрации молекул кислорода. Атмосферное давление  $p = 10^5 \text{ Па}$ .

$$\rho_{\text{аз}} \approx \frac{\rho_{\text{воз}}}{\beta} \frac{1+\beta}{\beta} = \rho_{\text{воз}} \frac{1+\beta}{\beta^2}$$

ЗАДАЧА 6. (МФТИ, 2008) Смесь гелия ( $\mu_{\text{г}} = 4 \text{ г/моль}$ ) и кислорода ( $\mu_{\text{к}} = 32 \text{ г/моль}$ ) имеет при давлении  $p = 10^5 \text{ Па}$  и температуре  $T = 300 \text{ К}$  плотность  $\rho = 0,3 \text{ кг/м}^3$ .

- 1) Найдите отношение числа молекул гелия к числу молекул кислорода.
- 2) Какой станет при том же объёме плотность смеси, если из неё удалить половину молекул гелия?

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{N_{\text{г}} \mu_{\text{г}} + N_{\text{к}} \mu_{\text{к}}}{V} = \frac{N_{\text{г}} \mu_{\text{г}}}{V} \left( 1 + \frac{N_{\text{к}} \mu_{\text{к}}}{N_{\text{г}} \mu_{\text{г}}} \right) = \rho_{\text{г}} \left( 1 + \frac{\mu_{\text{к}}}{\mu_{\text{г}}} \frac{N_{\text{к}}}{N_{\text{г}}} \right)$$

ЗАДАЧА 7. (МОШ, 2007, 10) В сосуде постоянного объёма находится смесь гелия и кислорода. Смесь нагревают от температуры  $T_1 = 300 \text{ К}$  до температуры  $T_2 = 4T_1/3 = 400 \text{ К}$ , при этом половина атомов гелия покидает сосуд, а давление газа остается прежним. Во сколько раз при этом изменяется плотность смеси? Молярная масса кислорода  $\mu_{\text{к}} = 32 \text{ г/моль}$ , гелия  $\mu_{\text{г}} = 4 \text{ г/моль}$ .

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(1/2)N_{\text{г}} \mu_{\text{г}} + N_{\text{к}} \mu_{\text{к}}}{(1/2)N_{\text{г}} \mu_{\text{г}} + N_{\text{к}} \mu_{\text{к}}} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$$

ЗАДАЧА 8. («Росатом», 2012, 11) В сосуде находится смесь азота и водорода. При температуре  $T_1$ , когда половина молекул азота диссоциировала на атомы, а диссоциации водорода не происходит, давление в сосуде равно  $p_1$ . При температуре  $T_2$ , когда диссоциировали все молекулы азота и треть молекул водорода, давление в сосуде равно  $p_2$ . Найти отношение числа атомов азота к числу атомов водорода в смеси.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{(1/2)N_{\text{а}} \mu_{\text{а}} + (2/3)N_{\text{в}} \mu_{\text{в}}}{(1/2)N_{\text{а}} \mu_{\text{а}} + N_{\text{в}} \mu_{\text{в}}} = \frac{2N_{\text{а}}}{3N_{\text{в}}}$$

ЗАДАЧА 9. (МФТИ, 1993) В модели изотермической атмосферы зависимость давления  $p(h)$  каждого газа, входящего в состав воздуха, от высоты  $h$  определяется барометрической формулой  $p = p_0 \exp(-\mu gh/RT)$ , где  $p_0$  — давление у поверхности земли,  $\mu$  — молярная масса компоненты воздуха,  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$  — газовая постоянная,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения. В литре воздуха, взятого при нормальных условиях у поверхности земли, содержится 23% (по массе) кислорода. Какая масса кислорода содержится в литре воздуха, взятого на вершине Эвереста (высота  $H = 8,9 \text{ км}$ )? Средняя молярная масса воздуха у поверхности Земли  $\mu_0 = 29 \text{ г/моль}$ .

$$\rho_0 \approx \rho_0 \exp\left(-\frac{\mu_0 g H}{RT}\right) \approx \rho_0 \left(1 - \frac{\mu_0 g H}{RT}\right)$$

ЗАДАЧА 10. (Всеросс., 1997, ОЭ, 11) В цилиндрическом сосуде при одинаковой температуре находятся углекислый газ и гелий, разделённые свободно перемещающимся лёгким поршнем. Гелий занимает объём в 5 раз больше, чем углекислый газ. Из-за нагрева газов до другой одинаковой температуры часть молекул углекислого газа диссоциировала на окись углерода и кислород:  $2\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} + \text{O}_2$ . В результате поршень сместился и объём гелия стал в 4 раза больше объёма образовавшейся смеси. Сколько процентов молекул углекислого газа диссоциировало?

□09

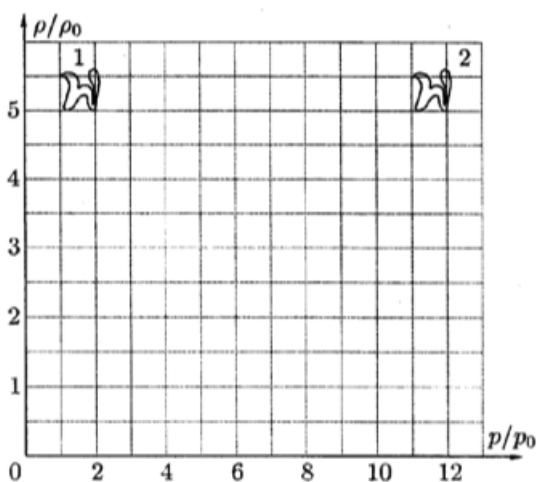
ЗАДАЧА 11. (Всеросс., 2005, ОЭ, 11) В цилиндре под поршнем находятся газы  $X_2$  и  $Y_2$  и соединение  $X_2Y$ . В системе протекает химическая реакция  $2X_2 + Y_2 \leftrightarrow 2X_2Y$ . В равновесном состоянии (когда скорости химической реакции в прямом и обратном направлениях равны) при давлении  $p$  система занимала объём  $V$ , а количества веществ  $X_2$ ,  $Y_2$  и  $X_2Y$  были равны  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  и  $\nu_3$  соответственно. Давление на систему изменили на малую величину  $\Delta p$ . Найдите изменения объёма системы  $\Delta V$  и количеств веществ  $\Delta \nu_1$ ,  $\Delta \nu_2$ ,  $\Delta \nu_3$  после установления нового равновесия. Температура всё время поддерживается постоянной.

*Примечание.* Известно, что скорость химической реакции пропорциональна произведению концентраций  $\nu_i/V$  реагирующих веществ. Соответственно, скорости прямой и обратной реакций пропорциональны  $(\frac{\nu_1}{V})^2 \frac{\nu_2}{V}$  и  $(\frac{\nu_3}{V})^2$ . Коэффициенты пропорциональности могут быть разными, но зависят только от температуры. Газы можно считать идеальными.

$$\left( \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \nu_1}{V} - \frac{\varepsilon_1}{V} + \frac{\varepsilon_2}{V} + \frac{\nu_1}{V} \right) \frac{d}{dV} = x \text{ или } \left( \frac{\varepsilon_1}{V} + \frac{\varepsilon_2}{V} + \frac{\nu_1}{V} \right) \Delta x = \Delta V \cdot x_2 = \varepsilon_1 \Delta V \cdot x_1 - \varepsilon_2 \Delta V \cdot x_2 = \nu_1 \Delta V$$

ЗАДАЧА 12. (Всеросс., 2010, финал, 10) При нормальных условиях кислород состоит из двухатомных молекул  $\text{O}_2$ . При повышении температуры часть молекул может диссоциировать, в результате чего из каждой молекулы  $\text{O}_2$  образуются два атома  $\text{O}$ .

На рисунке показаны два идентичных циклических процесса 1 и 2 в координатах  $(\rho, p)$ , где  $\rho$  — плотность газа,  $p$  — давление. По осям отложены безразмерные величины  $p/p_0$  и  $\rho/\rho_0$ , где  $p_0$  и  $\rho_0$  — некоторые масштабные коэффициенты. При проведении первого эксперимента рабочим веществом служил молекулярный кислород  $\text{O}_2$  (низкие температуры). Второй эксперимент проводился при значительно более высоких температурах. При этом часть кислорода находилась в молекулярном ( $\text{O}_2$ ), а часть — в атомарном ( $\text{O}$ ) состоянии, и степень диссоциации не изменялась в течение эксперимента. Масса газа в обоих экспериментах была одной и той же. Известно, что отношение максимальных температур в этих экспериментах  $k_{\max} = T_{2,\max}/T_{1,\max} = 5,0$ .



1) Определите степень диссоциации  $\alpha$  (долю диссоциированных молекул) молекул кислорода во втором эксперименте.

2) Определите отношение  $k_{\min}$  минимальных температур в этих экспериментах.

$$\frac{9}{55} = \frac{\nu+1}{11} = \text{или } \left( \frac{\nu}{1} = \nu \right)$$