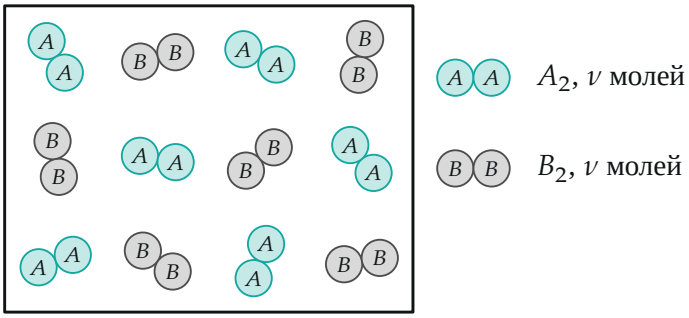
Реакция двухатомных газов

Задача 1. [Росатом 2018/19, заключительный этап, 11 класс, задача 1] Два двухатомных газа A_2 и B_2, взятые в равном количестве молей, находятся в сосуде под давлением p. Происходит химическая реакция с образованием газообразного соединения A_2B. Известно, что образовалось максимально возможное количество этого газа. Какое давление будет в сосуде при той же температуре после прохождения реакции?

▲ **Решение. Что происходит.** Сосуд закрыт, поэтому объём V не меняется, а температура по условию та же. Давление газа при этом определяется только тем, сколько молекул в сосуде: по закону Дальтона давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений, а значит, пропорционально полному числу молей $p = \dfrac{\nu_{\text{полн}} RT}{V}$, из каких бы молекул смесь ни состояла. Реакция сводит несколько молекул в одну, молей становится меньше, и давление падает. Класс задачи: «химическая реакция в закрытом сосуде» — стехиометрия (сколько чего прореагировало) плюс уравнение состояния для смеси до и после.



до реакции

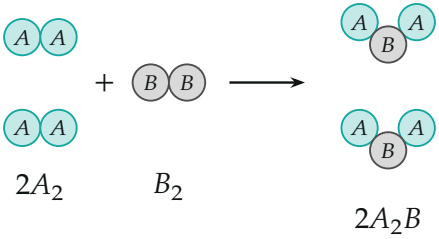
Поясняющий рисунок: сосуд до реакции, поровну молекул A_2 и B_2

Обозначения. ν — число молей каждого газа до реакции; p_1 — давление после реакции; V и T не меняются.

1. Уравнение реакции. В молекуле A_2B два атома A и один атом B. Атомы при реакции не появляются и не исчезают, поэтому из A_2 и B_2

молекулы A_2B собираются так: две молекулы A_2B содержат четыре атома A и два атома B, то есть это две молекулы A_2 и одна молекула B_2:

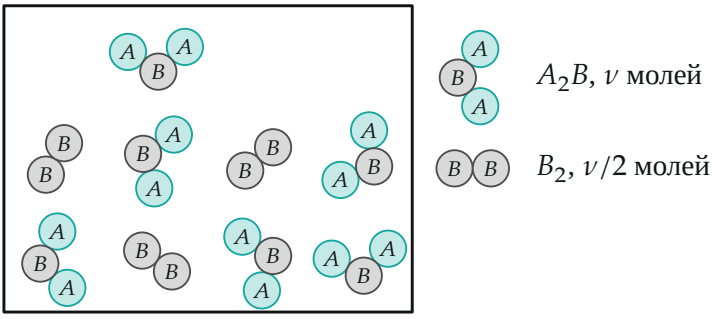
$$2A_2 + B_2 \to 2A_2B.$$



Реакция: три молекулы превращаются в две

2. Что прореагирует целиком. На каждую молекулу B_2 нужно две молекулы A_2. Исходных молей поровну, значит, A_2 не хватит раньше: «образовалось максимально возможное количество A_2B» означает, что весь A_2 израсходован. Все ν молей A_2 образуют ν молей A_2B, и на это уходит вдвое меньше B_2, то есть $\nu/2$ молей. Остаётся $\nu - \nu/2 = \nu/2$ молей B_2.

3. Сколько молей газа в сосуде. До реакции $\nu_{\text{до}} = \nu + \nu = 2\nu$. После реакции $\nu_{\text{после}} = \nu\,(A_2B) + \dfrac{\nu}{2}\,(B_2) = \dfrac{3\nu}{2}$.



после реакции

Сосуд после реакции: A_2 не осталось, B_2 стало вдвое меньше

4. Давление. Запишем уравнение Клапейрона — Менделеева для всей смеси газов до и после реакции (закон Дальтона: все газы заполняют один и тот же объём V при одной температуре T):

$$pV = 2\nu RT, \qquad p_1 V = \frac{3\nu}{2} RT.$$

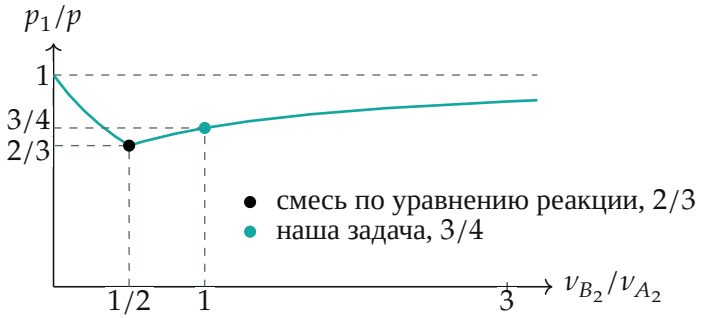
Разделим второе уравнение на первое: V, T, R и неизвестное ν сокращаются, а давление выражается через начальное:

$$\frac{p_1}{p} = \frac{3\nu/2}{2\nu} = \frac{3}{4} \quad \Rightarrow \quad p_1 = \frac{3}{4} p.$$

Давление упало, потому что число молекул упало: три молекулы превратились в две, и это единственное, что важно для давления.

Обратите внимание: A_2B — газ (так сказано в условии), поэтому он тоже создаёт давление. Если бы продукт оказался жидким или твёрдым, давление создавал бы только оставшийся B_2.

Второй способ. Посчитаем числом молекул. Пусть было N молекул A_2 и N молекул B_2, всего $2N$. Каждая реакция уничтожает две молекулы A_2 и одну B_2 и создаёт две молекулы A_2B, то есть число молекул убывает на 1. Реакций за всё время $N/2$ (на них уходят все N молекул A_2). Молекул осталось $2N - N/2 = 3N/2$, и $p_1/p = \dfrac{3N/2}{2N} = \dfrac{3}{4}$.



Давление после реакции и отношение начальных количеств газов

Проверка. Размерность: p_1/p — безразмерное отношение чисел молей. Посмотрим на общий случай, когда B_2 взято в $x = \nu_{B_2}/\nu_{A_2}$ раз больше, чем A_2 (график). При $x \geq 1/2$ кончается A_2, остаётся $\nu_{A_2}(x - \frac{1}{2})$ молей B_2 и получается ν_{A_2} молей A_2B, откуда $\dfrac{p_1}{p} = \dfrac{x + 1/2}{x + 1}$; при $x = 1$ это $\dfrac{3}{4}$. При $x \leq 1/2$ кончается B_2, и $\dfrac{p_1}{p} = \dfrac{1}{1 + x}$. Обе ветви сходятся при $x = 1/2$, где смесь взята точно по уравнению реакции: из трёх молекул получаются две и давление падает сильнее всего, до $\dfrac{2}{3}p$. Если B_2 очень много ($x \to \infty$), прореагирует малая доля молекул и $p_1 \to p$. Ответ $\dfrac{3}{4}p$ лежит между этими пределами.

Смысл: давление считает молекулы, а не вещества, поэтому уравнение реакции даёт ответ без единого числа.

Ответ. $p_1 = \dfrac{3}{4}p$.