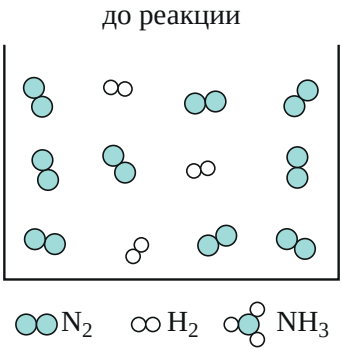
Синтез аммиака

Задача 1а. [Росатом 2024/25, отборочный этап, 10 класс, задача 1а] «Синтез аммиака».

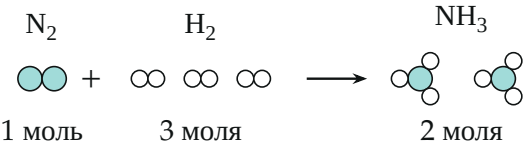
В сосуде находятся три моля молекулярного азота N_2 и один моль молекулярного водорода H_2. В некоторый момент времени в сосуде происходит химическая реакция образования аммиака $3H_2 + N_2 = 2NH_3$, причем известно, что аммиака образовалось максимально возможное количество. Увеличилось или уменьшилось количество молекул в сосуде? Во сколько раз? Какое из веществ — азот или водород — находятся в избытке, а какое в недостатке?



Пояснение к условию: состав сосуда до реакции; одна молекула на рисунке изображает $\frac{1}{3}$ моля, всего 9 молекул азота (3 моля) и 3 молекулы водорода (1 моль)

▲ **Решение.** **Что происходит.** Реакция идёт, пока не закончится одно из исходных веществ. По уравнению реакции вещества вступают в неё в отношении количеств вещества: на 1 моль азота — 3 моля водорода, и получается 2 моля аммиака. Количество молекул в сосуде пропорционально количеству вещества ($N = \nu N_\text{A}$), поэтому все вопросы решаем в молях. Выясним, какого вещества не хватит (оно закончится первым и задаст, сколько аммиака образуется), а потом пересчитаем состав сосуда.

Обозначения. ν_{N_2}, ν_{H_2}, ν_{NH_3} — количества веществ в сосуде; ν — полное количество вещества (всех газов); ξ — количество вещества азота, которое вступило в реакцию.



Уравнение реакции $3H_2 + N_2 = 2NH_3$: из 4 молекул получаются 2

1. Чего не хватает. Сравним запасы с отношением из уравнения. На 1 моль водорода нужна $\frac{1}{3}$ моля азота, а азота есть 3 моля, — азота с избытком. Наоборот, на 3 моля азота потребовалось бы 9 молей водорода, а есть только 1 моль, — водорода не хватает. Значит, реакция остановится, когда водород кончится, и именно тогда аммиака получится максимально возможное количество (как сказано в условии).

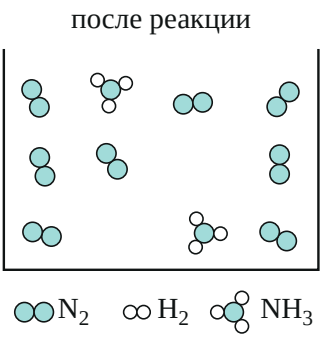
2. Состав после реакции. За время реакции в неё вступило ξ молей азота, по уравнению с ним — 3ξ молей водорода, и образовалось 2ξ молей аммиака:

$$\nu_{H_2} = 1 - 3\xi, \qquad \nu_{N_2} = 3 - \xi, \qquad \nu_{NH_3} = 2\xi.$$

Водород закончился: $1 - 3\xi = 0$, откуда $\xi = \frac{1}{3}$ моля. Тогда

$$\nu_{H_2} = 0, \qquad \nu_{N_2} = 3 - \frac{1}{3} = \frac{8}{3} \text{ моля}, \qquad \nu_{NH_3} = \frac{2}{3} \text{ моля}.$$

Азот остался и в избытке ($\frac{8}{3}$ моля), водород прореагировал полностью.



После реакции: 8 молекул азота и 2 молекулы аммиака (10 вместо 12)

3. Сколько молекул стало. Полное количество вещества после реакции

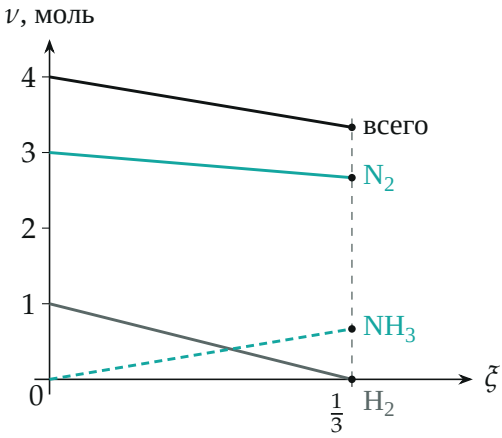
$$\nu = \frac{8}{3} + \frac{2}{3} = \frac{10}{3} \text{ моля,}$$

до реакции было $\nu_0 = 3 + 1 = 4$ моля. Число молекул пропорционально количеству вещества, поэтому

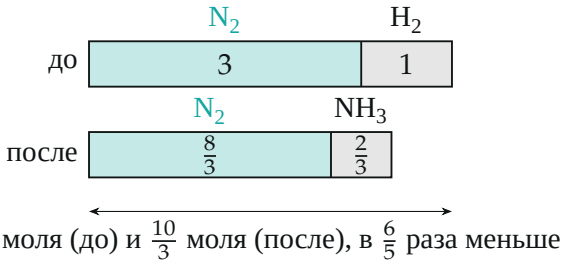
$$\frac{N_0}{N} = \frac{\nu_0}{\nu} = \frac{4}{10/3} = \frac{6}{5} = 1{,}2.$$

Количество молекул уменьшилось в $\frac{6}{5}$ раза.

Обратите внимание: число молекул при реакции не сохраняется — сохраняются число атомов каждого сорта и масса. Здесь из четырёх молекул (1 азота и 3 водорода) получаются две молекулы аммиака, поэтому каждый «акт» реакции убавляет число молекул на 2.



Состав сосуда в ходе реакции: водород убывает втрое быстрее азота, аммиака прибывает вдвое больше, чем убывает азота; на $\xi = \frac{1}{3}$ водород кончается



Количества вещества (в молях): сумма уменьшилась с 4 до $\frac{10}{3}$

4. Второй способ. Каждое прореагировавшее «звено» уравнения (1 молекула азота и 3 водорода, итого 4) даёт 2 молекулы аммиака, число молекул падает на 2. Реакций было $\xi = \frac{1}{3}$ моля, поэтому $\nu = 4 - 2\xi = 4 - \frac{2}{3} = \frac{10}{3}$ — тот же результат.

Проверка. Атомы азота: до реакции $2\cdot 3 = 6$ молей, после $2\cdot\frac{8}{3}+\frac{2}{3} = 6$. Атомы водорода: до $2 \cdot 1 = 2$ моля, после $3 \cdot \frac{2}{3} = 2$. Масса ($M_{N_2} = 28$, $M_{H_2} = 2, M_{NH_3} = 17$ г/моль): до $3\cdot 28+2 = 86$ г, после $\frac{8}{3}\cdot 28+\frac{2}{3}\cdot 17 = 86$ г. Всё сходится.

Смысл: из каждых четырёх молекул получаются две, поэтому в сосуде молекул стало меньше; сколько именно, определяет вещество в недостатке — водород.

Ответ. Количество молекул уменьшилось в $\frac{6}{5} = 1{,}2$ раза (с 4 до $\frac{10}{3}$ моля); азот находится в избытке, водород — в недостатке.