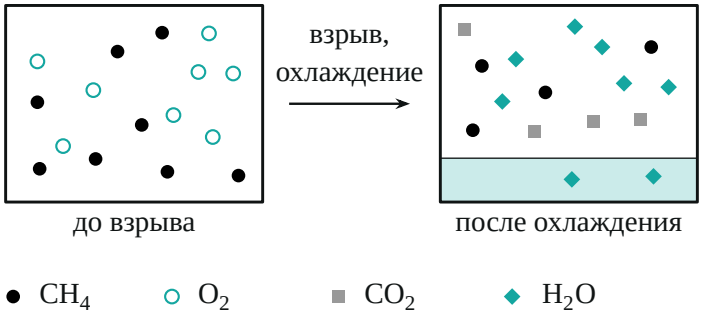
# Взрыв метана с кислородом

**Задача 1.** [Росатом 2024/25, заключительный этап, 11 класс, задача 1] Во взрывной камере находится смесь метана ($CH_4$) и кислорода ($O_2$) при температуре $t = 100\,^\circ\text{C}$ и давлении $p = \frac{8}{3}p_0$ ($p_0$ — атмосферное давление), причём парциальные давления метана и кислорода в смеси одинаковы. От электрической искры в камере происходит взрыв — соединение метана с кислородом с образованием углекислого газа ($CO_2$) и воды ($H_2O$) и выделением большого количества теплоты. Известно, что прореагировало максимально возможное количество метана. Найти давление в камере после охлаждения продуктов сгорания до первоначальной температуры $t = 100\,^\circ\text{C}$. Все газы считать идеальными. Объёмом сконденсировавшейся воды пренебречь.




*Поясняющий рисунок: до взрыва метана и кислорода поровну (по 8 молекул), после охлаждения часть воды — жидкость на дне*

▲ **Решение. Что происходит.** Камера жёсткая, объём $V$ не меняется. В смеси идеальных газов каждый газ создаёт своё парциальное давление, и давление смеси равно их сумме (закон Дальтона). Метан и кислород сгорают, и новые газы — углекислый газ и водяной пар — тоже входят в сумму. Главная идея задачи — следить не за давлением, а за *числом молей* каждого вещества: при одинаковых $T$ и $V$ давление газа прямо пропорционально его числу молей. Кроме того, это задача о насыщенном паре: после охлаждения до 100 °C воды получилось столько, что пар может оказаться предельно насыщенным, и тогда лишняя вода уйдёт в

жидкость. Поэтому действуем по шаблону «предположение → проверка».

**Обозначения.** $T = 373$ К — температура до взрыва и после охлаждения; $V$ — объём камеры; $\nu_0$ — число молей метана до взрыва; $p_{CH_4}$, $p_{O_2}$, $p_{CO_2}$, $p_{H_2O}$ — парциальные давления газов.

**1. Число молей метана и кислорода до взрыва.** Запишем уравнение Клапейрона — Менделеева для каждого газа отдельно: он занимает весь объём $V$ при температуре $T$, поэтому $p_i V = \nu_i RT$. Парциальные давления метана и кислорода равны, значит, равны и числа молей: $\nu_{CH_4} = \nu_{O_2} = \nu_0$. По закону Дальтона для смеси идеальных газов

$$p_{CH_4} + p_{O_2} = \frac{8}{3} p_0 \quad \Rightarrow \quad p_{CH_4} = p_{O_2} = \frac{4}{3} p_0 = \frac{\nu_0 RT}{V}.$$

Последнее равенство нам пригодится: *одному* $\nu_0$ молей соответствует давление $\frac{4}{3}p_0$ при $T$ и $V$.

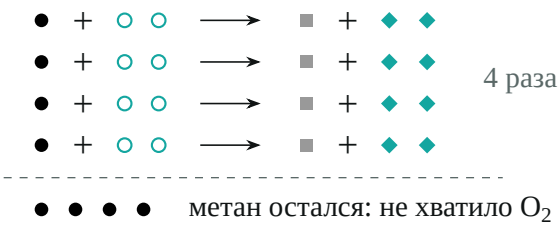
**2. Что прореагирует.** Уравнение реакции

$$CH_4 + 2\,O_2 \;\to\; CO_2 + 2\,H_2O.$$

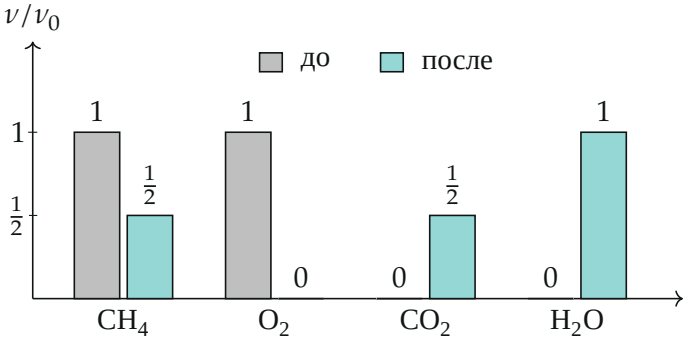
На каждую молекулу метана нужны две молекулы кислорода, а кислорода по числу молей столько же, сколько метана. Значит, кислорода не хватает на весь метан: «максимально возможное количество метана» прореагирует, когда кислород кончится. Для $\nu_0$ молей кислорода это $\nu_0/2$ молей метана. Составим баланс:

| | $CH_4$ | $O_2$ | $CO_2$ | $H_2O$ |
|---|---|---|---|---|
| до взрыва | $\nu_0$ | $\nu_0$ | 0 | 0 |
| после взрыва | $\nu_0/2$ | 0 | $\nu_0/2$ | $\nu_0$ |

Из одной молекулы метана получается одна молекула $CO_2$ и две молекулы воды, поэтому $\nu_{CO_2} = \nu_0/2$, а $\nu_{H_2O} = 2 \cdot \nu_0/2 = \nu_0$.




*Сколько метана успевает сгореть: восьми молекул кислорода хватает на четыре молекулы метана, остальные четыре остаются*




*Число молей каждого вещества до и после реакции в единицах $\nu_0$: кислород израсходован полностью, метан — наполовину*

**3. Газы после охлаждения.** Продукты сгорания остыли до прежней температуры $T$, объём тот же. Из пункта 1 известно, что $\nu_0$ молей при $T$ и $V$ дают давление $\frac{4}{3}p_0$, а давление прямо пропорционально числу молей. Поэтому

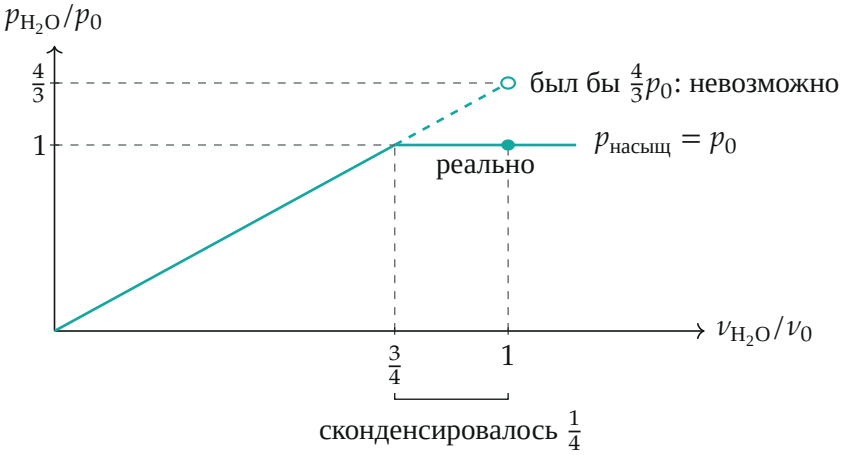
$$p_{CH_4} = \frac{\nu_0/2}{\nu_0} \cdot \frac{4}{3} p_0 = \frac{2}{3} p_0, \qquad p_{CO_2} = \frac{\nu_0/2}{\nu_0} \cdot \frac{4}{3} p_0 = \frac{2}{3} p_0.$$

Это давления газов, которые не конденсируются: метан и углекислый газ при 100 °C остаются газами.

**4. Предположение о воде.** Допустим, что вся вода осталась паром. Тогда её (воображаемое) давление $\tilde{p}_{H_2O}$ в $\nu_0/(\nu_0/2) = 2$ раза больше, чем у метана:

$$\tilde{p}_{H_2O} = \frac{\nu_0}{\nu_0} \cdot \frac{4}{3} p_0 = \frac{4}{3} p_0 > p_0.$$

Но водяной пар при 100 °C не может иметь давление выше давления насыщенного пара, а оно при этой температуре равно атмосферному $p_0$ (вода кипит при 100 °C под давлением $p_0$). Предположение неверно: часть пара конденсируется, пока давление пара не упадёт до $p_0$. Оставшийся пар насыщенный, и его давление не зависит от присутствия других газов (закон Дальтона): $p_{H_2O} = p_0$. Сколько воды стало жидкостью, видно по давлению: паром осталось только $p_0/(\frac{4}{3}p_0) = \frac{3}{4}$ всей воды, то есть $\frac{3}{4}\nu_0$ молей, то есть $\frac{1}{4}$ часть ($\nu_0/4$ молей) сконденсировалась.

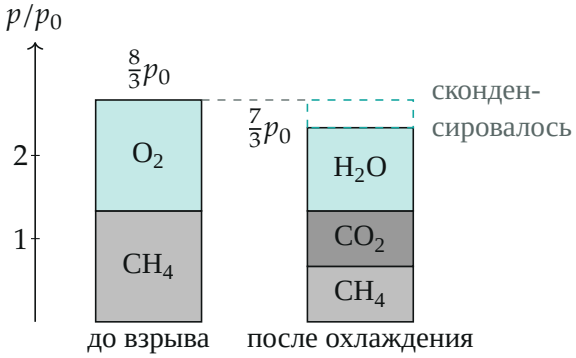



*Давление водяного пара при 100 °C: растёт с числом молей пара до насыщения ($p_0$), дальше лишняя вода уходит в жидкость*

**5. Давление смеси.** Сложим парциальные давления трёх газовых компонент (закон Дальтона для смеси идеальных газов и насыщенного пара):

$$p = p_{CH_4} + p_{CO_2} + p_{H_2O} = \frac{2}{3}p_0 + \frac{2}{3}p_0 + p_0 = \frac{7}{3}p_0.$$

Давление упало с $\frac{8}{3}p_0$ до $\frac{7}{3}p_0$: число молей газа уменьшилось из-за конденсации воды.




*Парциальные давления до взрыва и после охлаждения: пар вместо $\frac{4}{3}p_0$ даёт только $p_0$, пунктиром показано недостающее*

**Второй способ.** Давление при постоянных $T$ и $V$ пропорционально числу молей газов (газом считаем и насыщенный пар). До взрыва газа было $2\nu_0$ молей и $p = \frac{8}{3}p_0$. После охлаждения в газовой фазе $\nu_0/2$ молей метана, $\nu_0/2$ молей углекислого газа и $\frac{3}{4}\nu_0$ молей пара, всего $\frac{7}{4}\nu_0$. Поэтому

$$p = \frac{7\nu_0/4}{2\nu_0} \cdot \frac{8}{3}p_0 = \frac{7}{8} \cdot \frac{8}{3}p_0 = \frac{7}{3}p_0.$$

Обратите внимание: если не проверить, что $\frac{4}{3}p_0 > p_0$, и сложить $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} + \frac{4}{3}$, получится $\frac{8}{3}p_0$ — «ничего не изменилось». Это ошибка: пар с давлением $\frac{4}{3}p_0$ при 100 °C пересыщен и обязан частично сконденсироваться (по критериям организаторов без этой проверки пункт 4 не засчитывается).

**Проверка.** Размерность: давление складывается из давлений. Предельный случай: если бы давление насыщенного пара при 100 °C было не меньше $\frac{4}{3}p_0$, конденсации бы не было, и давление осталось бы $\frac{8}{3}p_0$, как до взрыва (число молей газа не меняется: $\nu_0 + \nu_0$ превращается в $\frac{\nu_0}{2} + \frac{\nu_0}{2} + \nu_0$). Результат $\frac{7}{3}p_0 < \frac{8}{3}p_0$ отражает уход четверти воды в жидкость.

**Ответ.** $p = \frac{7}{3}p_0$ (метан и $CO_2$ по $\frac{2}{3}p_0$, насыщенный водяной пар $p_0$, четверть воды сконденсировалась).