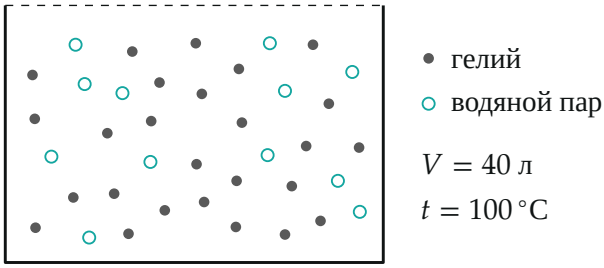
# Гелий и вода в сосуде

**Задача 1.** [Росатом 2025/26, заключительный этап, 11 класс, задача 1] В сосуде объёмом $V = 40$ л находятся в равновесном состоянии гелий и $m = 20$ г воды (или водяного пара) при температуре $t = 100\,^\circ\text{C}$. Известно, что давление газа в сосуде $p = 2 \cdot 10^5$ Па. Определить количество молей гелия в сосуде. Считать, что атмосферное давление $p_\text{а} = 10^5$ Па, а водяной пар считать идеальным газом. Молярная масса воды $M = 18$ г/моль. Универсальная газовая постоянная $R = 8{,}31$ Дж/(моль·К).

▲ **Решение.** **Что происходит.** В сосуде два газа, они не вступают в реакцию, и давление смеси равно сумме парциальных давлений гелия и пара (закон Дальтона). Вопрос в том, сколько воды перешло в пар. Жидкая вода может быть в равновесии только с *насыщенным* паром, а при $100\,^\circ\text{C}$ давление насыщенного пара равно атмосферному $p_\text{а}$. Поэтому сначала проверим, хватает ли 20 г воды, чтобы создать такое давление пара: если не хватает, вся вода испарилась, а пар ненасыщенный.



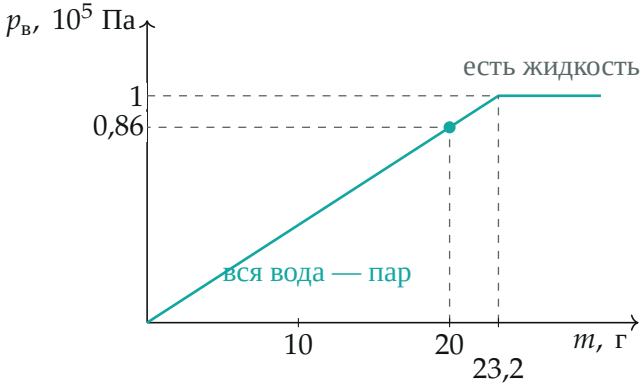

*Поясняющий рисунок: смесь гелия и водяного пара в сосуде*

**Обозначения.** $T = 373$ К; $m_1$ — масса насыщенного пара, который заполнил бы сосуд при $p_\text{а}$; $p_\text{в}$ — давление пара в сосуде; $p_\text{г}$ — давление гелия; $\nu$ — число молей гелия.

**1. Предположим, что вода осталась жидкой.** Тогда пар в сосуде насыщенный и его давление $p_\text{а}$. Запишем уравнение Клапейрона — Менделеева для пара, заполняющего сосуд объёмом $V$:

$$p_\text{а}V = \frac{m_1}{M}RT \quad \Rightarrow \quad m_1 = \frac{p_\text{а}VM}{RT} = \frac{10^5 \cdot 0{,}04 \cdot 0{,}018}{8{,}31 \cdot 373}\ \text{кг} \approx 23{,}2\ \text{г}.$$

Чтобы создать давление $p_а$, нужно 23,2 г пара, а воды всего 20 г $< m_1$. Предположение неверно: вся вода испарилась, жидкости нет, пар *ненасыщенный*, $p_в < p_а$.



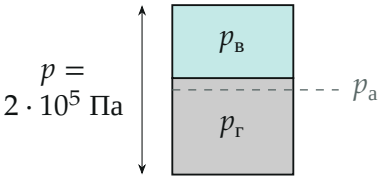

*Давление пара в сосуде в зависимости от массы воды: до 23,2 г вся вода — пар, дальше появляется жидкость*

**2. Давление пара.** Весь пар — идеальный газ при $T = 373$ К в объёме $V$, поэтому

$$p_в = \frac{mRT}{MV} = \frac{0{,}020 \cdot 8{,}31 \cdot 373}{0{,}018 \cdot 0{,}040}\ \text{Па} \approx 0{,}86 \cdot 10^5\ \text{Па}.$$

**3. Давление гелия.** По закону Дальтона для смеси идеальных газов $p = p_г + p_в$, откуда

$$p_г = p - p_в = (2 - 0{,}86) \cdot 10^5\ \text{Па} \approx 1{,}14 \cdot 10^5\ \text{Па}.$$




*Полное давление смеси складывается из давления гелия и давления пара*

**4. Количество гелия.** Для гелия, занимающего весь сосуд при той же температуре, запишем уравнение Клапейрона — Менделеева:

$$\nu = \frac{p_{\text{г}} V}{RT} = \frac{pV}{RT} - \frac{m}{M}.$$

Подставим числа:

$$\nu = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0{,}04}{8{,}31 \cdot 373} - \frac{20}{18}\ \text{моль} \approx 2{,}58 - 1{,}11 \approx 1{,}47\ \text{моль}.$$

То же самое получается вычитанием: полное число молей газа в сосуде $pV/RT$, из них $m/M$ приходится на пар.

Обратите внимание: давление $p_{\text{а}}$ не вошло в формулу для $\nu$ — оно нужно только для проверки, что вся вода испарилась. Если бы воды было больше 23,2 г, пар остался бы насыщенным при $p_{\text{а}}$, и $\nu = (p - p_{\text{а}})V/(RT) \approx 1{,}29$ моль.

**Проверка.** Размерность: $pV/RT$ — моли. Предел: воды нет ($m \to 0$) — $\nu = pV/RT$, весь газ — гелий. На границе $m = m_1$ (пар как раз насыщенный) оба выражения совпадают: $p_{\text{в}} = p_{\text{а}}$, $\nu = (p - p_{\text{а}})V/RT$.

**Ответ.** $\nu_{\text{He}} = \dfrac{pV}{RT} - \dfrac{m}{M} \approx 1{,}47$ моль (вся вода — ненасыщенный пар, $p_{\text{в}} \approx 0{,}86 \cdot 10^5$ Па).