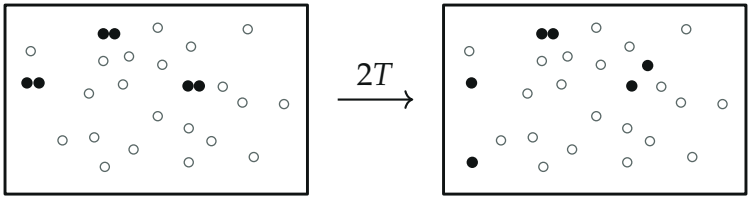
Азот и гелий с диссоциацией

Задача 3. [Росатом 2018/19, отборочный этап, 11 класс, площадка 2, задача 3] В сосуде находится смесь одинаковых масс азота N_2 и гелия He под давлением p. Абсолютную температуру газа увеличивают вдвое, при этом $2/3$ молекул азота диссоциируют на атомы. Найти давление смеси газов при этой температуре. Молярные массы газов равны $\mu_{He} = 4$ г/моль, $\mu_{N_2} = 28$ г/моль. Газы считать идеальными.



Поясняющий рисунок (в масштабе по числу частиц): серые кружки — атомы гелия, чёрные пары — молекулы N_2, одиночные чёрные — атомы N; на 3 молекулы азота приходится 21 атом гелия, после нагрева 2 молекулы из 3 распались на 4 атома

▲ **Решение. Что происходит.** Давление идеального газа при заданных объёме и температуре определяется только числом частиц, а не их сортом: $p = \nu_{общ} RT/V$ (закон Дальтона плюс уравнение Менделеева — Клапейрона). Нагрев увеличивает давление по двум причинам: вдвое растёт T, и растёт число частиц, потому что каждая распавшаяся молекула азота даёт два атома. Главная идея — считать моли частиц до и после. Масса газа не дана, но она сократится в отношении давлений.

Обозначения. m — масса каждого газа, V — объём сосуда, $\nu = m/\mu_{N_2}$ — число молей азота в начале; через ν выразим все количества вещества.

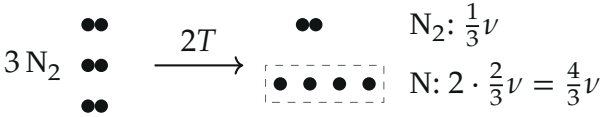
1. Сколько молей в начале. Количество вещества гелия той же массы:

$$\nu_{He} = \frac{m}{\mu_{He}} = \frac{\mu_{N_2}}{\mu_{He}}\,\nu = \frac{28}{4}\,\nu = 7\nu.$$

Лёгкий гелий при равной массе даёт в 7 раз больше частиц. Всего в начале $\nu + 7\nu = 8\nu$ молей частиц.

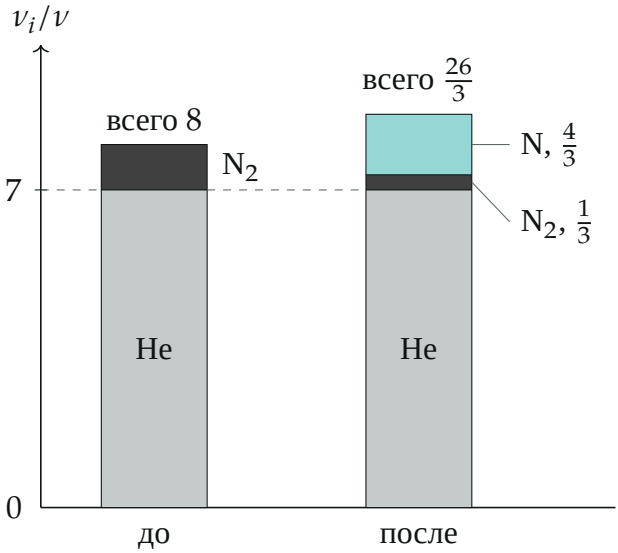
2. Сколько молей после нагрева. Распалось $\frac{2}{3}$ молекул азота, осталось $\frac{1}{3}\nu$ молей N_2; каждая распавшаяся молекула дала два атома: $2\cdot\frac{2}{3}\nu = \frac{4}{3}\nu$ молей N. Гелий не меняется. Всего

$$\nu'_{\text{общ}} = 7\nu + \frac{1}{3}\nu + \frac{4}{3}\nu = \frac{26}{3}\,\nu.$$



1 молекула + 4 атома

Распад азота: из трёх молекул две распались, каждая дала два атома; частиц азота стало 5 вместо 3



Количество вещества частиц каждого сорта в единицах ν: до нагрева 8ν, после — $\frac{26}{3}\nu$

3. Давления до и после. Уравнение Менделеева — Клапейрона для смеси (по закону Дальтона давление смеси — сумма парциальных, то есть определяется полным числом молей):

$$p = \frac{8\nu RT}{V}, \qquad p' = \frac{\frac{26}{3}\nu R \cdot 2T}{V}.$$

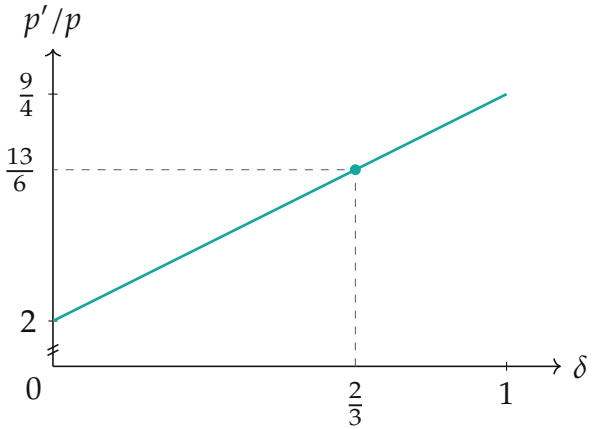
Делим второе на первое — ν, R, T и V сокращаются:

$$\frac{p'}{p} = \frac{\frac{26}{3}\cdot 2}{8} = \frac{13}{6}.$$

4. Как давление зависит от доли распавшихся молекул. Если распалась доля δ молекул азота, частиц станет $8\nu + \delta\nu$ (каждая распавшаяся молекула добавляет одну частицу), и

$$\frac{p'}{p} = \frac{2(8+\delta)}{8} = 2 + \frac{\delta}{4}.$$

При $\delta = \frac{2}{3}$ получаем $2 + \frac{1}{6} = \frac{13}{6}$ — тот же ответ другим путём.



Отношение давлений в зависимости от доли δ распавшихся молекул азота (при удвоенной температуре); точка — условие задачи

Обратите внимание: распад молекул не меняет массу газа, но меняет число частиц, а давление идеального газа считает именно частицы. Без диссоциации давление выросло бы ровно вдвое.

Соберём ответ. $p' = 2 \cdot \dfrac{26/3}{8}\, p = \dfrac{13}{6}\, p \approx 2{,}17\, p$.

Проверка. Размерность: давление. Пределы: $\delta = 0$ — $p' = 2p$ (просто удвоили температуру); $\delta = 1$ — весь азот атомарный, частиц 9ν, $p' = \frac{9}{4}p$; наш ответ лежит между ними. Второй способ — в пункте 4 (через прирост числа частиц).

Смысл: азот составляет лишь $\frac{1}{8}$ частиц смеси, поэтому даже заметная диссоциация добавляет к давлению немного — всего $\frac{1}{6}p$ сверх удвоения.

Ответ. $p' = \dfrac{13}{6}\, p \approx 2{,}17\, p$.