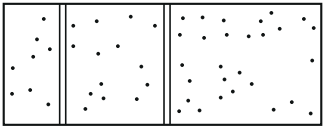
Перегородки в цилиндре с газами

Задача 3. [Росатом 2018/19, отборочный этап, 11 класс, площадка 3, задача 3] Запаянный горизонтальный цилиндрический сосуд длиной l разделён на три отсека двумя подвижными перегородками (см. рисунок). В левом отсеке содержится 1 моль криптона, в среднем — по 1 молю криптона и неона, в правом — по 1 молю криптона и неона и 2 моля гелия. Перегородки находятся в равновесии. В некоторый момент времени перегородки становятся проницаемыми для гелия и остаются непроницаемыми для неона и криптона. Найти перемещения перегородок к моменту установления равновесия. Температуры газов одинаковы и не меняются в течение процесса.



▲ **Решение. Что происходит.** Перегородка в равновесии, когда давления газов слева и справа от неё равны. При одинаковой температуре давление газа в отсеке пропорционально числу молей, делённому на объём, поэтому в равновесии длины отсеков пропорциональны числам молей газа в них. Когда перегородки начинают пропускать гелий, он растекается по всему сосуду и выравнивает свою концентрацию; его парциальное давление по обе стороны каждой перегородки становится одинаковым и на перегородку не действует. Главная идея: в новом равновесии гелий можно просто «не замечать» — перегородки расставляют только криптон и неон.

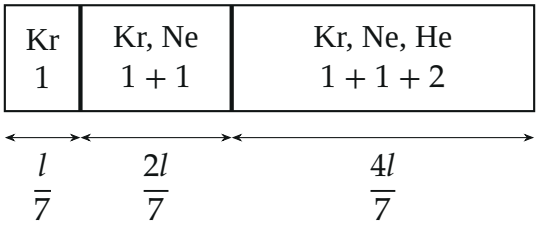
Обозначения. S — сечение сосуда, T — температура, x_1 и x_2 — расстояния от левого торца до левой и правой перегородок, штрих — после установления нового равновесия. Перегородки тонкие, их толщиной пренебрегаем.

1. Начальное положение перегородок. Уравнение Менделеева — Клапейрона для газа в отсеке, по закону Дальтона — для смеси с полным числом молей ν_i: $p_i = \dfrac{\nu_i RT}{SL_i}$, где L_i — длина отсека. В отсеках

$\nu = 1$, 2 и 4 моля. Условие равновесия перегородок — давления равны:

$$\frac{1}{L_1} = \frac{2}{L_2} = \frac{4}{L_3}, \qquad L_1 + L_2 + L_3 = l \quad \Rightarrow \quad L_1 = \frac{l}{7},\ L_2 = \frac{2l}{7},\ L_3 = \frac{4l}{7}.$$

Перегородки стоят в точках $x_1 = \frac{l}{7}$, $x_2 = \frac{3l}{7}$.

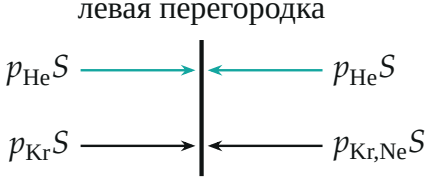


Начальное равновесие: числа молей 1 : 2 : 4, *длины отсеков в том же отношении*

2. Гелий после того, как перегородки стали проницаемыми. Для гелия перегородок нет: его концентрация выравнивается по всему сосуду, и парциальное давление гелия p_{He} одинаково во всех отсеках, где бы ни стояли перегородки. Условие равновесия перегородки — равенство полных давлений с двух сторон:

$$p_{\text{He}} + p^{\text{слева}}_{\text{Kr,Ne}} = p_{\text{He}} + p^{\text{справа}}_{\text{Kr,Ne}} \quad \Rightarrow \quad p^{\text{слева}}_{\text{Kr,Ne}} = p^{\text{справа}}_{\text{Kr,Ne}}.$$

Гелий сократился. Значит, перегородки расставляют только непроницаемые газы: 1 моль в левом отсеке, 2 моля в среднем и 2 моля в правом.

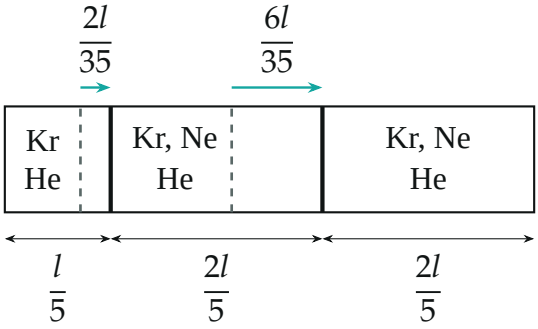


Силы давления на левую перегородку в новом равновесии: силы давления гелия (бирюзой) равны и уравновешивают друг друга, остаются силы давления криптона и неона

3. Новое положение перегородок. Теперь давления непроницаемых газов равны:

$$\frac{1}{L_1'} = \frac{2}{L_2'} = \frac{2}{L_3'}, \qquad L_1' + L_2' + L_3' = l \quad \Rightarrow \quad L_1' = \frac{l}{5},\ L_2' = L_3' = \frac{2l}{5}.$$

Перегородки стоят в точках $x_1' = \frac{l}{5}$, $x_2' = \frac{3l}{5}$.



Новое равновесие: гелий во всех отсеках, перегородки (пунктир — прежнее положение) сдвинулись вправо

4. Перемещения.

$$\Delta x_1 = x_1' - x_1 = \frac{l}{5} - \frac{l}{7} = \frac{2l}{35}, \qquad \Delta x_2 = x_2' - x_2 = \frac{3l}{5} - \frac{3l}{7} = \frac{6l}{35}.$$

Обе перегородки сдвигаются вправо: гелий ушёл из правого отсека в другие, и правый отсек сжался.

Обратите внимание: в новом равновесии давления в отсеках снова одинаковы, но гелий в отсеках распределён пропорционально их объёмам (0,4, 0,8 и 0,8 моля), а не поровну и не весь в правом.

Соберём ответ. Левая перегородка сдвигается вправо на $\frac{2l}{35}$, правая — вправо на $\frac{6l}{35}$.

Проверка. Размерность: длина. Второй способ — прямой расчёт с гелием. Пусть гелий занимает весь сосуд с одинаковой концентрацией, тогда в отсеке длины L его $2L/l$ моля. Равенство полных давлений

$\frac{1+2L_1'/l}{L_1'} = \frac{2+2L_2'/l}{L_2'}$ даёт $\frac{1}{L_1'} = \frac{2}{L_2'}$ — то же, что без гелия; с длинами $\frac{l}{5}$, $\frac{2l}{5}$, $\frac{2l}{5}$ полные числа молей 1,4; 2,8; 2,8, и давления $\propto \frac{1{,}4}{1} = \frac{2{,}8}{2} = \frac{2{,}8}{2} = 1{,}4$ равны. Предел: если бы гелия не было вовсе, перегородки и так стояли бы в $\frac{l}{5}$ и $\frac{3l}{5}$ — гелий в новом равновесии ничего не решает.

Смысл: проницаемый газ не может держать перегородку, поэтому её положение определяют только те газы, для которых она — стенка.

Ответ. Обе перегородки сдвинутся вправо: левая на $\frac{2l}{35}$, правая на $\frac{6l}{35}$.