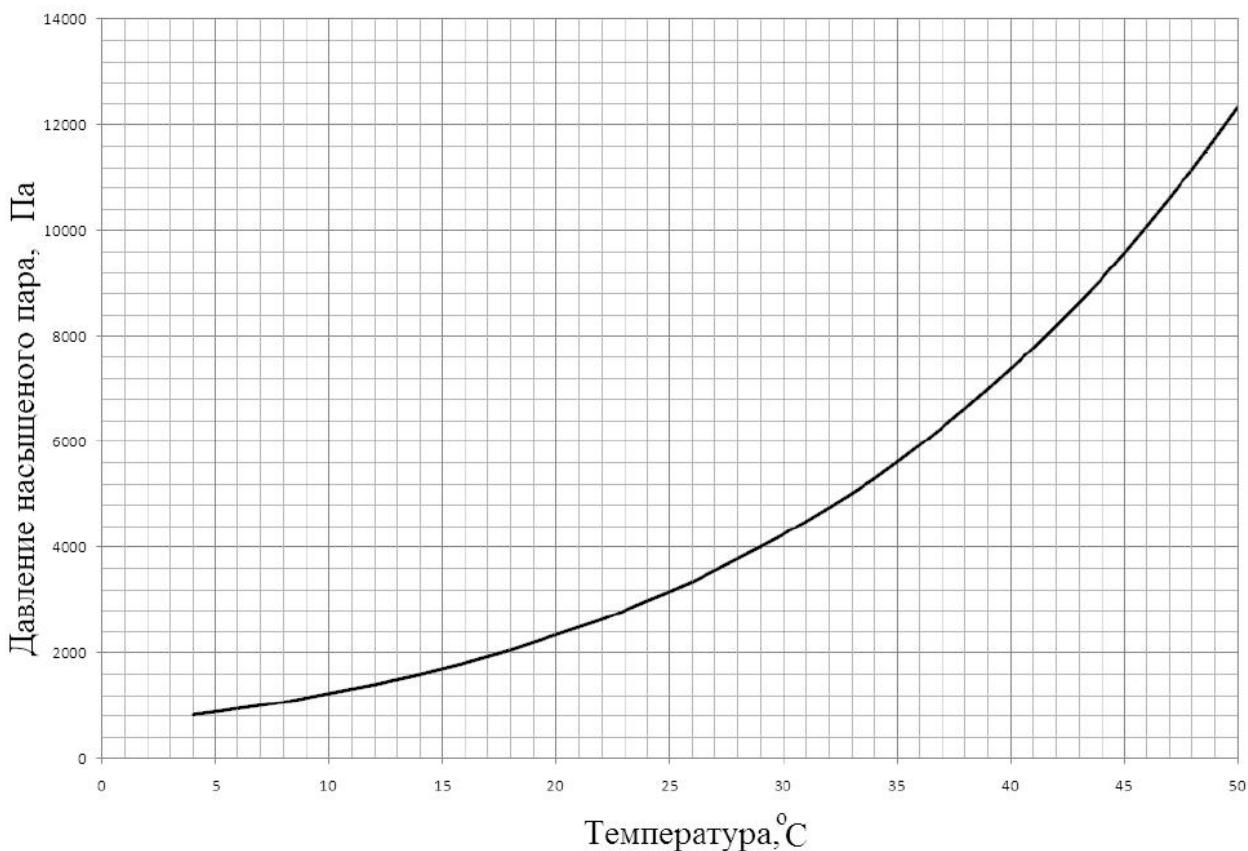


**11.2.** В процессе дыхания человека воздух, находящийся в альвеолах легких, из-за испарения воды достигает 100% влажности. Однако измерения относительной влажности выдыхаемого теплого воздуха показывают лишь 80% из-за наличия трахеи и бронхов, в которых испарение воды практически не происходит.

А) Оцените общий объем альвеол у человека (в литрах), если суммарный объем легких и дыхательных путей равен 5 л, а влажностью воздуха в дыхательных путях можно пренебречь.

Б) Оцените, сколько воды (в граммах) теряет здоровый человек (с температурой тела 36,6 °C) за сутки через выдыхаемый воздух, если в окружающей среде температура 20 °C и относительная влажность 50%? Принять, что в покое за 1 минуту легкие человека вентилируют 6 л воздуха, который прогревается до температуры тела. Молярная масса воды 18 г/моль.



*Решение.*

А) При выходе 100% влажного воздуха из альвеол он смешивается с практически сухим воздухом дыхательных путей, вследствие чего снижается относительная влажность.

$$\varphi_2 V_{общ} = \varphi_1 V_A, \quad (1)$$

где  $\varphi_1 = 100\%$  – относительная влажность воздуха в альвеолах,  $\varphi_2 = 80\%$  – относительная влажность воздуха после смешивания с сухим воздухом,  $V_A$  – объем альвеол,  $V_{общ}$  – общий объем дыхательных путей и альвеол.

$$V_A = V_{общ} \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = 4 \text{ л.} \quad (2)$$

Б) При температуре  $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293\text{ K}$  и относительной влажности  $\varphi_0 = 50\%$  окружающей среды давление паров воды во вдыхаемом воздухе будет равно  $p_0 = 0,5 * 2400\text{ Pa} = 1200\text{ Pa}$ .

Найдем массу воды в альвеолах при поступлении туда вдыхаемого воздуха. Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$p_0V = \frac{m_0}{\mu} RT_0; \quad (3)$$

$$m_0 = \frac{p_0 V \mu}{R T_0}. \quad (4)$$

Здесь  $V$  – объем вентилируемого за 1 минуту воздуха, который за минуту проходит через альвеолы (80% от всего объема, т.е.  $V = 4,8\text{ л.}$ ). Как вариант, можно рассматривать весь вентилируемый объем с относительной влажностью  $\varphi_2 = 80\%$ .

В конце вдоха температура воздуха повышается до  $T_1 = 36,6^\circ\text{C} = 309,6\text{ K}$ , что при 100% влажности дает давление паров воды  $p_1 = 6000\text{ Pa}$ .

$$p_1V = \frac{m_1}{\mu} RT_1. \quad (5)$$

Масса воды в альвеолах в конце вдоха:

$$m_1 = \frac{p_1 V \mu}{R T_1}. \quad (6)$$

Таким образом, за 1 минуту испаряется масса воды:

$$m_1 - m_0 = \frac{p_1 V \mu}{R T_1} - \frac{p_0 V \mu}{R T_0} = \frac{V \mu}{R} \left( \frac{p_1}{T_1} - \frac{p_0}{T_0} \right) \approx 0,16\text{ г.} \quad (7)$$

За сутки испарится  $0,16\text{ г} * 60 * 24 \approx 230\text{ г}$  воды.

*Примечание:* после нагрева вдыхаемого воздуха с  $20^\circ\text{C}$  до  $36,6^\circ\text{C}$  его относительная влажность будет  $\varphi_0 = 0,5 * 2400\text{ Pa} / 6000\text{ Pa} = 20\%$ . Если учесть это при решении пункта А, получим:

$$V_{общ} = V_A + V_\Pi;$$

$$\varphi_2 V_{общ} = \varphi_1 V_A + \varphi_0 V_\Pi.$$

Решая систему уравнений, получаем  $V_A = 0,75 V_{общ} = 3,75\text{ л}$ , что близко к 4 л.

## Разбалловка

<b>№</b>	<b>Критерий</b>	<b>Баллы</b>
1	Записано уравнение (1) для влажности в альвеолах и в выдыхаемом воздухе	1
2	Найден объем альвеол 4 л (допустим вариант 3,75 л)	1
3	По графику найдено парциальное давление паров воды 1200 Па во вдыхаемом воздухе (с учетом относительной влажности 50%).	1
4	Записано уравнение (3) для вдыхаемого воздуха.	1
5	Записано выражение (4) для массы воды $m_0$ для вдыхаемого воздуха в вентилируемом за 1 минуту (или другое время) объеме альвеол	1
6	По графику найдено парциальное давление паров воды 6000 Па для воздуха в альвеолах.	1
7	Записано уравнение (5) для воздуха в альвеолах.	1
8	Записано выражение (6) для массы воды $m_1$ для воздуха в конце вдоха в вентилируемом за 1 минуту (или другое время) объеме альвеол	1
9	Найдена масса воды, которая испаряется в альвеолах за 1 минуту	1
10	Найдена масса воды, которая испаряется в альвеолах за 1 сутки	1
	<b>Сумма</b>	<b>10</b>

### Примечания по разбалловке:

- могут считать вентилируемый объем сразу за 1 сутки, тогда за п. 9 и 10 ставим вместе 2 балла.

- если не учесть испарение воды только в альвеолах, то ответ получается на 20% больше – 0,20 г/мин и 288 г/сутки. За такой ответ предлагается ставить за п. 9 и 10 по 0,5 балла.