

Урок №13

Тема: «Измерение влажности воздуха» (решение задач)

Срок сдачи работ до 08.12.2023

При решении задач надо иметь в виду, что давление и плотность насыщенного пара не зависят от его объёма, а зависят только от температуры. Уравнение состояния идеального газа приближённо применимо и для описания насыщенного пара. Но при сжатии или нагревании насыщенного пара его масса не остаётся постоянной.

При решении некоторых задач могут понадобиться значения давления, насыщенного пара при некоторых температурах. Эти данные нужно брать из таблицы.

Зависимость давления P и плотности ρ насыщенного водяного пара от температуры

t, °C	P , кПа	ρ , г/м ³	t, °C	P , кПа	ρ , г/м ³
- 5	0,40	3,2	11	1,33	10,0
0	0,61	4,8	12	1,40	10,7
1	0,65	5,2	13	1,49	11,4
2	0,71	5,6	14	1,60	12,1
3	0,76	6,0	15	1,71	12,8
4	0,81	6,4	16	1,81	13,6
5	0,88	6,8	17	1,93	14,5
6	0,93	7,3	18	2,07	15,4
7	1,0	7,8	19	2,20	16,3
8	1,06	8,3	20	2,33	17,3
9	1,14	8,8	25	3,17	23,0
10	1,23	9,4	50	12,3	83,0

Задача 1. Давление влажного воздуха в сосуде под поршнем при температуре $t = 100$ °C равно $p_1 = 1,8 \cdot 10^5$ Па. Объём под поршнем изотермически уменьшили в $k = 4$ раза. При этом давление в сосуде увеличилось в $n = 3$ раза. Найдите относительную влажность ϕ воздуха в первоначальном состоянии. Утечкой вещества из сосуда пренебречь.

Решение.

1. При $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$ давление насыщенного водяного пара равно нормальному атмосферному давлению: $p_0 = 10^5$ Па.

2. При изотермическом сжатии произведение pV для влажного воздуха под поршнем уменьшилось, так как $n < k$. Значит, количество вещества влажного воздуха в сосуде уменьшилось за счёт конденсации части водяного пара в воду. При этом водяной пар стал насыщенным.

3. Пусть p_2 — давление влажного воздуха в сосуде в конечном состоянии, $p_{1\text{сух}}$ — давление сухого воздуха в сосуде в начальном состоянии.

Пользуясь законом Дальтона, запишем выражения для давления влажного воздуха в сосуде в начальном и конечном состояниях:

$$\begin{cases} p_1 = p_{1\text{сух}} + \varphi p_0 \\ p_2 = np_1 = kp_{1\text{сух}} + p_0 \end{cases}$$

Исключая из этих уравнений величину $p_{1\text{сух}}$, получим уравнение

$$np_1 = k(p_1 - \varphi p_0) + p_0,$$

откуда

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{(k-n)p_1 + p_0}{kp_0} \\ \varphi &= \frac{(4-3) \cdot 1,8 \cdot 10^5 + 10^5}{4 \cdot 10^5} = \frac{2,8}{4} = 0,7 \end{aligned}$$

Ответ: 70%.

Задача 2. Закрытый сосуд объёмом $V_1 = 0,5\text{ м}^3$ содержит воду массой $m = 0,5$ кг. Сосуд нагрели до температуры $t = 147\text{ }^\circ\text{C}$. На сколько следует изменить объём сосуда, чтобы в нём содержался только насыщенный пар? Давление насыщенного пара $p_{\text{н.п}}$ при температуре $t = 147\text{ }^\circ\text{C}$ равно $4,7 \cdot 10^5$ Па.

Решение.

Насыщенный пар при давлении $p_{\text{н.п}}$ занимает объём,

равный $V = \frac{mRT}{p_{\text{н.п}}M} \approx 0,2\text{ м}^3$, где $M = 0,018$ кг/моль — молярная масса воды.

Объём сосуда $V_1 > V$, а значит, пар не является насыщенным. Для того чтобы пар стал насыщенным, объём сосуда следует уменьшить на

$$\Delta V = V_1 - V = V_1 - \frac{mRT}{p_{н.п} \cdot M} = 0,3 \text{ м}^3.$$

Задача 3. В комнате объёмом 40 м³ температура воздуха 20 °С, его относительная влажность $\varphi_1 = 20 \%$. Сколько надо испарить воды, чтобы относительная влажность φ_2 достигла 50 %? Известно, что при 20 °С давление насыщающих паров $p_{н.п} = 2330 \text{ Па}$.

Решение.

Относительная влажность $\varphi_1 = \frac{p_{п1}}{p_{н.п}} 100 \%$ отсюда

$$\varphi_1 = \frac{p_{п1}}{p_{н.п}} 100 \%, \quad \varphi_2 = \frac{p_{п2}}{p_{н.п}} 100 \%.$$

Давление пара при относительной влажности φ_1 и φ_2

$$p_{п1} = \frac{\varphi_1 p_{н.п}}{100 \%}, \quad p_{п2} = \frac{\varphi_2 p_{н.п}}{100 \%}.$$

Плотность связана с давлением равенством $\rho = Mp/RT$, откуда

$$\rho_1 = \frac{Mp_{п1}}{RT}, \quad \rho_2 = \frac{Mp_{п2}}{RT}.$$

Массы воды в комнате при влажности φ_1 и φ_2

$$m_1 = \rho_1 V = \frac{Mp_{п1}}{RT} V, \quad m_2 = \rho_2 V = \frac{Mp_{п2}}{RT} V.$$

Масса воды, которую надо испарить:

$$m = m_2 - m_1 = \frac{MV}{RT} (p_{п2} - p_{п1}) = \frac{Mp_{н.п} V}{RT 100 \%} (\varphi_2 - \varphi_1) = 0,208 \text{ кг}.$$

Задача 4. Стекланный сосуд, содержащий воздух с относительной влажностью 50 % при $t_1 = 30 \text{ °С}$, плотно закрыли крышкой и нагрели до $t_2 = 50 \text{ °С}$. Опираясь на законы молекулярной физики, объясните, как изменятся при этом парциальное давление водяного пара и относительная влажность воздуха в сосуде.

Решение.

Учитывая, что сосуд с паром жесткий, получаем изохорный процесс, при котором объем остается неизменным. Тогда из уравнения Менделеева-Клайперона следует отношение

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2},$$

где P_1, P_2 - парциальные давления паров при температурах T_1, T_2 соответственно. При увеличении температуры получаем, что $T_2 > T_1$ и из соотношения следует, что и $P_2 > P_1$, то есть давление увеличивается.

При увеличении температуры плотность насыщенного пара ρ_n будет увеличиваться, а плотность пара в сосуде $\rho_{пара}$ не изменится (так как сосуд герметичный, масса газов не меняется). Так как относительная влажность воздуха определяется выражением

$$\varphi = \frac{\rho_{пара}}{\rho_n} \cdot 100\%,$$

то относительная влажность воздуха уменьшится.

Ответ: парциальное давление увеличится, относительная влажность уменьшится.

Домашнее задание:

1. Изучить и законспектировать решение задач, представленное в теории.
2. Решить задачи:

Задача 1. Относительная влажность воздуха в помещении 60%, температура 18 °С. До какой температуры надо охладить металлический предмет, чтобы его поверхность запотела?

Задача 2. Относительная влажность воздуха при температуре 100 °С равна 40%. Определите парциальное давление водяных паров, содержащихся в воздухе.