

Лист 3.

Насыщенный пар

1. В комнате объемом $V_1 = 60 \text{ м}^3$ относительная влажность воздуха равна $\varphi_1 = 80\%$, а в соседней с ней объемом $V_2 = 36 \text{ м}^3$ влажность равна $\varphi_2 = 60\%$. Какая относительная влажность установится в комнатах после открывания двери, соединяющей комнаты? Температура в обеих комнатах до и после открывания двери одинакова.

2. В сосуде объемом $V = 100 \text{ л}$ при температуре 27°С находится воздух с относительной влажностью $\varphi_1 = 30\%$. Определите, чему будет равна относительная влажность, если при той же температуре количества пара в сосуде увеличить на $m = 1 \text{ г}$. Давление насыщенных паров при 27°С $P_n = 4 \cdot 10^3 \text{ Па}$.

3. В воздухе с относительной влажностью $\varphi = 50\%$ давление паров воды при температуре $t = 7^\circ \text{С}$ равно $P = 500 \text{ Па}$. Определите давление P_n и плотность насыщенного пара ρ_n при этой температуре?

4. Относительная влажность воздуха в сосуде объемом $V = 1 \text{ м}^3$ при $t = 20^\circ \text{С}$ равна $\varphi = 60\%$. Какую массу m воды необходимо испарить в сосуд до насыщения пара?

5. В двух сосудах объемами $V_1 = 10 \text{ л}$ и $V_2 = 20 \text{ л}$ находится воздух при одной и той же температуре. Относительная влажность воздуха в первом сосуде $\varphi_1 = 60\%$. Определите относительную влажность φ_2 воздуха во втором сосуде, если после соединения сосудов установившаяся влажность воздуха в сосудах при неизменной температуре стала равной $\varphi = 20\%$.

6. В сосуде объемом $V_1 = 7 \text{ л}$ находится воздух с относительной влажностью $\varphi_1 = 50\%$. Какой объем V_2 воздуха с относительной влажностью $\varphi_2 = 70\%$ нужно закачать в этот сосуд, чтобы на его стенках появилась роса? Температура воздуха во всех случаях одинакова.

7. В сосуде под поршнем находится $m = 18 \text{ г}$ водяного пара при давлении $P = 60 \text{ кПа}$ и температуре $t = 100^\circ \text{С}$. Какая масса Δm пара сконденсируется при изотермическом уменьшении объема сосуда в $n = 5$ раз? Объемом сконденсированной воды по сравнению с объемом сосуда пренебречь.

8. Человек при частоте дыхания $n = 10 \text{ мин}^{-1}$ за один раз вдыхает $V = 2 \text{ л}$ воздуха при температуре $t_1 = 27^\circ \text{С}$ и влажности $\varphi_1 = 30\%$, а выдыхает при температуре $t_2 = 36^\circ \text{С}$ и влажности $\varphi_2 = 100\%$. Какая масса m воды теряется организмом за $\tau = 24 \text{ ч}$ в процессе дыхания? Давление насыщенного пара при температуре $t_1 = 27^\circ \text{С}$ равно $P_{n1} = 3,6 \text{ кПа}$, при температуре $t_2 = 36^\circ \text{С}$ равно $P_{n2} = 6 \text{ кПа}$.

9. В сосуд объемом $V = 10 \text{ л}$ ввели $m = 18 \text{ г}$ воды. Какая часть δ воды испарится, если сосуд герметично закрыть и нагреть до $t = 100^\circ \text{С}$? Объемом воды по сравнению с объемом сосуда пренебречь.

10. Сосуд объемом $V = 3 \text{ л}$ откачали до глубокого вакуума, ввели в него $m = 10 \text{ г}$ воды, нагрели до температуры $t = 120^\circ \text{С}$ и измерили давление. Оно оказалось равным $P = 200 \text{ кПа}$. Является ли водяной пар в сосуде насыщенным?

11. Для измерения влажности воздуха в сосуд, соединенный с манометром и содержащий исследуемый воздух, добавили небольшое количество воды и быстро закрыли пробкой. Через некоторое время часть воды испарилась и давление в сосуде перестало увеличиваться, достигнув величины, превышающей начальное давление на $\Delta P = 1 \text{ кПа}$. Какова относительная влажность φ исследуемого воздуха? Давление насыщенного пара в условиях опыта $P_n = 2,33 \text{ кПа}$.

12. В баллон, содержащий воздух с относительной влажностью φ , закачали некоторое количество сухого воздуха. Как изменилась при этом относительная влажность воздуха в сосуде при постоянной температуре? Ответ обосновать.

13. Влажность воздуха в воздушном шарике $\varphi_1 = 80\%$. В шарик дополнительно закачали некоторое количество сухого воздуха, в результате чего объем шарика удвоился. Определите относительную влажность φ_2 воздуха в шарике, считая температуру постоянной.

14. В замкнутом помещении объемом $V = 120 \text{ м}^3$ относительная влажность $\varphi = 80\%$. Сколько еще граммов m воды может испариться в этом помещении из открытого сосуда? Температура в помещении $t = 20^\circ \text{С}$.

15. В вертикальном цилиндре под невесомым поршнем находится воздух с относительной влажностью $\varphi = 40\%$. Определите, какой массы m груз нужно положить на поршень площадью $S = 80 \text{ см}^2$, чтобы на стенках цилиндра появилась роса. Температуру считать постоянной. Давление воздуха над поршнем равно $P_0 = 100 \text{ кПа}$.

16. В сосуде находятся жидкость и ее насыщенный пар. В процессе изотермического расширения объем, занимаемый паром, увеличивается в $\beta = 3$ раза, а давление пара уменьшается в $\alpha = 2$ раза. Найдите отношение n массы жидкости к массе пара, первоначально содержащихся в сосуде.

17. В сосудах объемами $V_1 = 10$ л и $V_2 = 20$ л находится воздух при одной и той же температуре. Относительная влажность воздуха в первом сосуде $\varphi_1 = 70\%$. После того, как сосуды перенесли в другое помещение и соединили тонкой трубкой, относительная влажность воздуха в сосудах стала равной $\varphi = 20\%$. Изменилась ли (если изменилась, то в какую сторону) температура воздуха в сосудах? Ответ обосновать.

18. В сосудах объемами $V_1 = 20$ л и $V_2 = 10$ л находится воздух при одной и той же температуре. Относительная влажность воздуха в первом сосуде $\varphi_1 = 20\%$. После того, как сосуды перенесли в другое помещение и соединили тонкой трубкой, относительная влажность воздуха в сосудах стала равной $\varphi = 50\%$. Изменилась ли (если изменилась, то в какую сторону) температура воздуха в сосудах? Ответ обосновать.

Ответы

$$1. \quad \varphi = \frac{\varphi_1 V_1 + \varphi_2 V_2}{V_1 + V_2} = 72\%.$$

$$2. \quad \varphi_2 = \varphi_1 + \frac{mRT}{\mu VP_H} = 0,65 = 65\%.$$

$$3. \quad P_H = \frac{P}{\varphi} 100\% = 1 \text{ кПа}, \quad \rho_H = \frac{\mu P \cdot 100\%}{\varphi RT} \approx 7,7 \text{ г/м}^3$$

$$4. \quad m = \frac{P_H V \mu}{R(t + 273)} \left(1 - \frac{\varphi}{100\%} \right) \approx 6,9 \text{ г}$$

$$5. \quad \varphi_2 = \varphi + (\varphi - \varphi_1) \frac{V_1}{V_2} = 0\%$$

$$6. \quad V_2 = \frac{(100\% - \varphi_1)V_1}{\varphi_2} = 5 \text{ л}$$

$$7. \quad \Delta m = m \left(1 - \frac{P_0}{nP} \right) = 12 \text{ г}$$

$$8. \quad m = \left(\frac{P_{H2}}{T_2} \varphi_2 - \frac{P_{H1}}{T_1} \varphi_1 \right) \cdot \frac{V \mu}{100\% \cdot R} n \tau \approx 1 \text{ кг}$$

$$9. \quad \delta = \frac{P_0 V \mu}{mR(273 + t)} \approx 0,32$$

10. Ответ: Если бы после нагрева вся вода испарилась, то давление пара было $P_H = mRT / \mu V \approx 600$ кПа. Следовательно, не вся вода испарилась, и пар является насыщенным.

$$11. \quad \varphi = \left(1 - \frac{\Delta P}{P_H} \right) 100\% \approx 57\%$$

12. Не изменилась.

$$13. \quad \varphi_2 = \varphi_1 / 2 = 40\% \quad 85\%$$

$$14. \quad m = \left(1 - \frac{\varphi}{100\%} \right) \rho_H V \approx 0,42 \text{ кг}$$

$$15. \quad m = \frac{P_0 S (100\% - \varphi)}{g \varphi} = 120 \text{ кг}$$

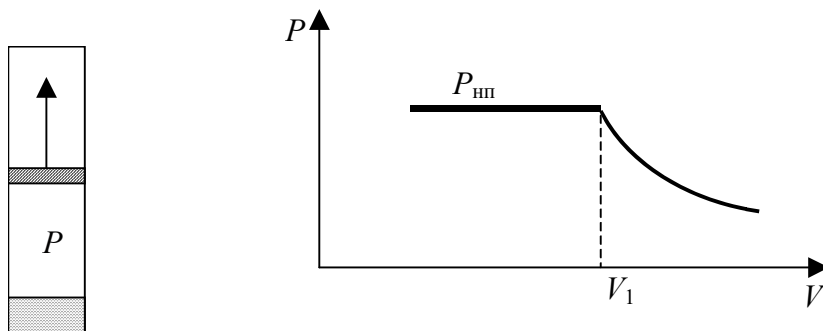
$$16. \quad n = \frac{\beta}{\alpha} - 1 = 0,5$$

$$17. \text{ Температура увеличилась, так как: } \frac{\rho_{H2}}{\rho_{H1}} = \frac{\varphi_1 V_1 + \varphi_2 V_2}{\varphi (V_1 + V_2)} > 1$$

$$18. \text{ Температура уменьшилась, так как: } \frac{\rho_{H2}}{\rho_{H1}} = \frac{\varphi_1 V_1 + \varphi_2 V_2}{\varphi (V_1 + V_2)} < \frac{\varphi_1 V_1 + 100\% \cdot V_2}{\varphi (V_1 + V_2)} < 1 \quad 10\%$$

Насыщенный пар. Влажность.

1. Предположим, что мы находимся в герметично закрытой комнате. Выльем на пол ведро воды. Через некоторое время вода высохнет - превратится в пар. Выльем на пол еще кружку воды, пождем - вновь через некоторое время лужица высохнет, вода испариться. Однако наступит момент, когда после добавления еще небольшой порции воды (чайной ложки, например), вода перестанет высыхать. Говорят, что в этом случае пар в комнате стал насыщенным. Процесс испарения воды не прекращается и в этом случае, но имеет место динамическое равновесие: количество воды, которое испаряется с поверхности воды в единицу времени равно количеству пара, который конденсируется (превращается в воду) за то же время. **Итак, насыщенный пар - это пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью.**
2. Признак, по которому можно отличить насыщенный пар от ненасыщенного простой: если пар находится в равновесии со своей жидкостью (количества жидкости и пара не меняются сколь угодно долго при неизменной температуре), то пар является насыщенным.
3. Проведем следующий опыт. Пусть у нас имеется длинный цилиндрический сосуд, в котором находится небольшое количество воды. Подвижный поршень первоначально касается поверхности воды. Будем поршень медленно поднимать и измерять давление пара под поршнем (воздуха под поршнем нет). Мы поднимаем поршень **медленно** для того, чтобы в любой момент времени успевало устанавливаться равновесие под поршнем - вода успевала испаряться в нужном количестве. Температура во время опыта поддерживается постоянной. График зависимости давления пара под поршнем от объема пара приведен на рисунке. Сначала при увеличении объема давление остается неизменным, количество воды при этом уменьшается, а количество пара увеличивается. Кажется, что результаты опыта противоречат уравнению Менделеева-Клапейрона $PV = \nu RT$, поскольку температура и давление постоянны, а объем увеличивается. Однако никакого парадокса нет. Необходимо учесть, что в нашем опыте увеличивается также количество пара (его масса m_n , число молей $\nu = m_n / \mu$, где μ - молярная масса воды).



При некотором объеме V_1 вся вода в сосуде превратится в пар. Дальнейшее увеличение объема не со-

провождается увеличением массы пара. Поэтому в соответствии с уравнение $PV = \frac{m_g}{\mu} RT$, где m_g -

первоначальная масса воды под поршнем, давление с ростом объема уменьшается. При этом под поршнем больше нет воды, только пар, который не является более насыщенным (он не находится в равновесии с жидкостью, которой в сосуде уже нет).

4. **Итак, основное свойство насыщенного пара - его давление не зависит от объема, а определяется только температурой.** Зависимость давления насыщенного пара $P_{нп}$ от температуры обычно измеряется и приводится в таблице (см., например, таблицу в задачнике Рымкевича).
5. Влажность воздуха характеризуется тем, насколько пар в воздухе далек от насыщения. Относительная влажность воздуха равна по определению

$$\varphi = \frac{P_{пара}}{P_{нп}} \quad (1)$$

Часто эту величину выражают в процентах, тогда

$$\varphi = \frac{P_{пара}}{P_{нп}} 100\% .$$

В этих формулах $P_{пара}$ - парциальное давление пара - это такое давление, которое производил бы пар в сосуде, если бы он в нем был один (без воздуха). Парциальное давление может быть найдено из уравнения

$$P_{пара}V = \frac{m_{пара}}{\mu}RT,$$

где V - объем сосуда.

6. При постоянной температуре давление пропорционально плотности газа. Это вытекает из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{\rho V}{\mu}RT \Rightarrow P = \frac{\rho}{\mu}RT.$$

Поэтому для относительной влажности можно также записать

$$\varphi = \frac{\rho_{пара}}{\rho_{нп}}. \quad (2)$$

7. Плотность насыщенного пара также приводится в таблицах или сообщается в условии задачи. Нужно в каждой конкретной задаче принять решение, какой из формул для относительной влажности удобнее пользоваться.
8. О кипении. Испарение жидкости происходит с ее поверхности. Обычно в жидкости на стенках и на дне сосуда имеются небольшие пузырьки воздуха. Конечно, кроме воздуха в этих пузырьках находится насыщенный пар. При повышении температуры давление насыщенного пара повышается. Когда оно сравнивается с давлением P окружающей пузырек жидкости и несколько превышает его, пузырек с насыщенным паром начинает расти и всплывать на поверхность. В результате пар выбрасывается в окружающее пространство. Это и есть кипение.

Давление в жидкости на глубине h складывается из гидростатического давления ρgh (ρ - плотность жидкости, h - глубина) и внешнего (атмосферного) давления над жидкостью P_0 . Заметим, что при нормальном давлении $P_0 = 10^5$ Па и глубине сосуда $h = 1$ м гидростатическое давление воды меньше атмосферного примерно в 10 раз. Поэтому в большинстве случаев можно считать, что давление в жидкости примерно равно атмосферному. P_0 .

Итак, при температуре, когда давление насыщенного пара становится равным давлению газа над жидкостью, начинается бурный процесс испарения жидкости не только с ее открытой поверхности, но и во всем объеме жидкости внутри пузырьков, которые выносят пар на поверхность жидкости. Жидкость кипит, когда давление насыщенного пара сравнивается с давлением газа над жидкостью. Известно, что при нормальном атмосферном давлении $P_0 = 10^5$ вода кипит при температуре $t = 100^\circ$ С. Следовательно при $t = 100^\circ$ С давление насыщенного водяного пара равно $P_{нп} = P_0$.

Приведите ошибочные утверждения.

1. Над поверхностью любой жидкости всегда есть пар. Одновременно протекают два процесса – испарение жидкости и ее конденсация.
2. Пар называют насыщенным, если в единицу времени испаряется столько же молекул, сколько их конденсируется.
3. Если при постоянной температуре количество пара в сосуде над жидкостью не меняется в течение сколь угодно длительного времени, то пар является насыщенным.
4. Отличительной особенностью насыщенного пара является то, что его давление не зависит от объема, а определяется только температурой.
5. Если сжимать насыщенный пар при постоянной температуре, то масса пара увеличивается, масса воды уменьшается, а давление остается неизменным.
6. Если сжимать ненасыщенный пар при постоянной температуре, то его давление будет расти.
7. Относительная влажность воздуха равна отношению давления воздуха к давлению насыщенного пара при данной температуре.
8. С ростом температуры давление насыщенного пара увеличивается.

Примеры решения задач

Пример 1.

В комнате объемом $V_1=60 \text{ м}^3$ относительная влажность воздуха равна $\varphi_1 = 80\%$, а в соседней с ней объемом $V_2 = 36 \text{ м}^3$ влажность равна $\varphi_2 = 60\%$. Какая относительная влажность установится в комнатах после открывания двери, соединяющей комнаты? Температура в обеих комнатах до и после открывания двери одинакова.

Решение.

Суммарная масса пара в обеих комнатах остается постоянной. Поэтому удобно записывать выражения для относительной влажности через плотность пара (масса/объем):

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{(m_1 / V_1)}{\rho_{\text{нп}}} \\ \varphi_2 = \frac{(m_2 / V_2)}{\rho_{\text{нп}}} \\ \varphi = \frac{m_1 + m_2}{(V_1 + V_2)\rho_{\text{нп}}} \end{array} \right.$$

В этих уравнениях учтено, что при неизменной температуре плотность насыщенного пара $\rho_{\text{нп}}$ остается постоянной. Выражая из первого уравнения m_1 , а из второго m_2 , найдем $\varphi = \frac{\varphi_1 V_1 + \varphi_2 V_2}{V_1 + V_2} = 72\%$.

Пример 2.

В сосуде объемом $V = 100 \text{ л}$ при температуре 27° С находится воздух с относительной влажностью $\varphi_1 = 30\%$. Определите, чему будет равна относительная влажность φ_2 , если при той же температуре количества пара в сосуде увеличить на $m = 1 \text{ г}$. Давление насыщенных паров при 27° С $P_{\text{н}} = 4 \cdot 10^3 \text{ Па}$.

Решение.

Дано давление насыщенного пара (а не плотность). Поэтому удобно записывать относительную влажность через давление:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = \frac{P_1}{P_{\text{н}}} \\ \varphi_2 = \frac{P_2}{P_{\text{н}}} \\ P_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT \\ P_2 V = \frac{m_1 + m}{\mu} RT \end{array} \right.$$

В этих уравнениях m_1 - первоначальная масса пара. Эта величина неизвестна. Чтобы "избавиться" от нее вычтем из последнего уравнение предпоследнее:

$$(P_2 - P_1)V = \frac{m}{\mu} RT.$$

Из первых двух уравнений получим

$$P_2 - P_1 = P_{\text{н}}(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Отсюда найдем

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{mRT}{\mu V P_{\text{н}}} = 0,65 = 65\%.$$