В ЕГЭ обсуждается относительная влажность

$$\varphi = \frac{p_{\text{пара}}}{p_{\text{насыщ. пара}}} = \frac{p_{\text{пара}}}{p_{\text{н}}},$$

где давление насыщенного пара берется обязательно при той же температуре, что и парциальное давление пара в данной газовой смеси (например, в воздухе). При заданной температуре концентрация молекул воды в насыщенном паре максимальна, поэтому относительная влажность не превосходит 100%. При температурах от 0 °C до 100 °C концентрация молекул воды в насыщенном водяном паре меньше, чем в любом газе при нормальных условиях (в том числе и в воздухе). Поэтому к насыщенному и ненасыщенному водяному пару применима модель идеального газа $p = nkT$, где p – парциальное давление пара, n – концентрация молекул пара, $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Это позволяет определить относительную влажность и по-другому:

$$\varphi = \frac{p_{\text{пара}}}{p_{\text{н}}} = \frac{n_{\text{пара}}}{n_{\text{н}}} = \frac{\rho_{\text{пара}}}{\rho_{\text{н}}},$$

где ρ – плотность вещества.

Особенность применения этой формулы к насыщенному водяному пару (да и к насыщенному пару любой другой жидкости) состоит в том, что концентрация молекул n в насыщенном паре растет с ростом температуры: $n = n(T)$. В школьном курсе явный вид этой зависимости не обсуждается, но даже и в этом случае удается на уровне качественного описания получить зависимость давления насыщенного пара от температуры. Построим с этой целью семейство графиков $p(T)$ в модели идеального газа при разных значениях концентрации n (рис. 1).

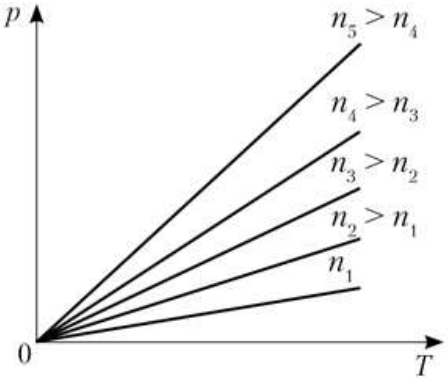


Рисунок 1

Выберем набор значений температуры $T_1 < T_2 < T_3 < T_4 < T_5$ так, чтобы каждое значение отвечало заданному значению концентрации насыщенного водяного пара: $T_1 \Leftrightarrow n_1$, $T_2 \Leftrightarrow n_2$ и так далее. Для этого при количественном построении графика нужны таблицы, а нам для качественного построения хватит того, что n растет с ростом T. Каждому T_i сопоставляем точку на графике с соответствующим n_i. Получаем семейство точек (рис. 2), через которые пройдет график зависимости давления насыщенного пара от температуры (рис. 3).

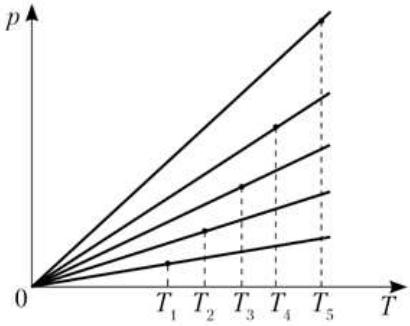


Рисунок 2

Рисунок 3

Полученная кривая имеет две крайних точки: критическую точку и тройную точку (в которой в равновесии друг с другом находятся вода, лед и пар). Если вспомнить, что кипение происходит, когда давление насыщенного пара оказывается равным внешнему давлению, то получим, что график обратной функции $T(p)$ (рис. 4) представляет собой зависимость температуры кипения от внешнего давления.

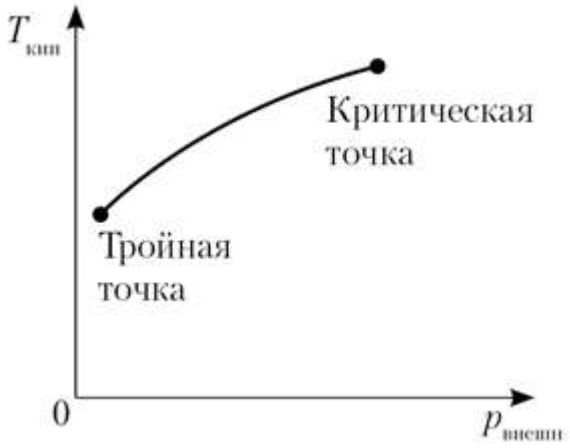


Рисунок 4

Несколько слов об изотерме воды и водяного пара. Ее вид показан во многих учебниках (рис. 5).

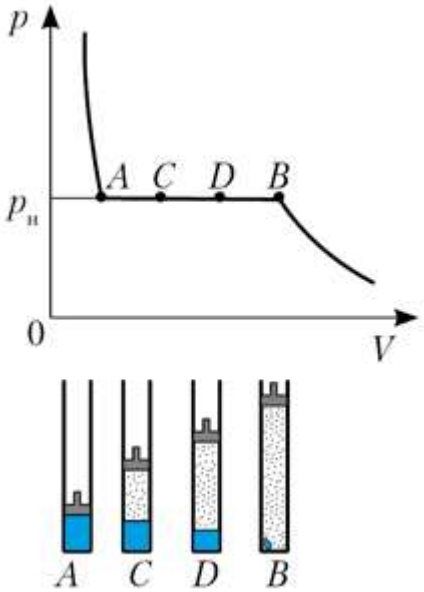


Рисунок 5

Левее точки *A* вся система представляет собой воду, которая демонстрирует очень слабую сжимаемость. В точке *A* над поверхностью воды появляется насыщенный водяной пар, но его доля в общей массе системы еще ничтожно мала. По мере увеличения объема системы (точки *C* и *D*) масса водяного пара растет, но его давление (на изотерме!) не меняется. Наконец, в точке *B* практически вся система переходит в пар, но он все еще насыщенный, так как ничтожная доля системы еще представляет собой жидкость. Правее точки *B* в системе уже нет жидкости, пар – ненасыщенный, подчиняется модели идеального газа с постоянным числом частиц.

Таким образом, на горизонтальном отрезке изотермы *AB* сосуществуют в равновесии друг с другом вода и ее пар. Значит, пар – насыщенный, его давление неизменно. Поэтому изотерма на участке *AB* является еще и изобарой. Если «смотреть вдоль» отрезка *AB*, он превращается в точку. Это точка на графике $p_н(T)$ зависимости давления насыщенного пара от температуры, взятая при заданном значении температуры на изотерме.

В сосуде под поршнем находится влажный воздух с относительной влажностью φ = 40 %. Объем под поршнем изотермически уменьшили в 3 раза. Чему стала равна относительная влажность воздуха в сосуде?

Решение. Применяя модель идеального газа к пару, как насыщенному, так и ненасыщенному, получим

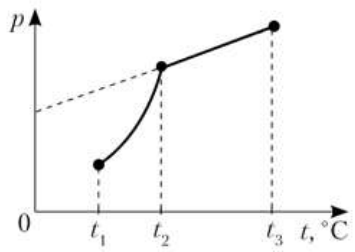
$$\varphi = \frac{p_{пара}}{p_н} = \frac{nkT}{n_н kT} = \frac{n}{n_н}.$$

Поскольку $n = \frac{N}{V}$, где N – число молекул, V – объем, занимаемый паром, получим, что уменьшение объема увеличивает концентрацию молекул. В первоначальном состоянии $n = 0{,}4n_н$ (согласно величине φ). Поэтому, когда объем уменьшится в 2,5 раза, концентрация n достигнет значения $n_н$, относительная влажность станет 100 %. Дальнейшее сжатие паров воды будет сопровождаться конденсацией части паров в воду, но концентрация паров останется равной $n_н$, то есть относительная влажность останется равной 100 %. Нетрудно установить, что в воду сконденсируется 1/6 от первоначальной массы пара. *Ответ*. φ = 100 %.

В замкнутом сосуде при комнатной температуре t_1 находятся только вода и ее насыщенный пар. Сосуд медленно нагревают. При температуре $t_2 = 2t_1$ воды в сосуде не остается. Сосуд продолжают нагревать до температуры $t_3 = 2t_2$.

Постройте график зависимости давления в сосуде от температуры: $p = p(t)$. Температура t задана в шкале Цельсия.

Решение. На участке от t_1 до t_2 пар находится в равновесии с водой, то есть он насыщенный. При температуре t_2 вся вода уже перешла в пар, поэтому при дальнейшем повышении температуры концентрация молекул пара постоянна, так как число молекул пара N и объем сосуда V не меняются.



Таким образом, на участке от t_1 до t_2 используем график зависимости $p_н(t)$ (см. рис. 3), а на участке от t_2 до t_3 используем один из графиков зависимости $p(t)$ при заданной концентрации (см. рис. 1). При температуре t_2 графики «сшиваются» без разрыва (рис.).

Вопрос. Зачем понадобилась комнатная температура? Зачем нужны соотношения $t_2 = 2t_1$, $t_3 = 2t_2$? *Ответ*. А затем, чтобы не обсуждать ситуацию с критической точкой и подобные частные случаи. Вода испарилась при температуре около 50 °C, просто перейдя в пар, а не потому, что потерялось различие между водой и паром, как в критической точке.

Задавая t_2 и t_3 через t_1, мы конкретизируем задачу построения графика. У него криволинейная часть лежит на участке от t_1 до t_2, а прямолинейная – на участке от t_2 до t_3. Если пропорции температур на графике не соблюдены, то это ошибка.

В замкнутом сосуде при температуре t = 100 °C находится влажный воздух под давлением $p = 1{,}5 \cdot 10^5$ Па. Относительная влажность воздуха φ = 50 %. Какое давление установится в сосуде, если его объем изотермически уменьшить в 4 раза?

Решение

- По закону Дальтона, давление влажного воздуха p складывается из парциального давления водяного пара p_1 и парциального давления сухого воздуха p_2: $p = p_1 + p_2$. При температуре t = 100 °C давление насыщенного водяного пара равно $p_0 = 10^5$ Па, так как это температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении. Поэтому парциальное давление водяного пара в начальном состоянии $p_1 = \varphi p_0 = 0{,}5 \cdot 10^5$ Па. Парциальное давление сухого воздуха $p_2 = p - p_1 = p - \varphi p_0 = 1{,}0 \cdot 10^5$ Па.
- При изотермическом сжатии воздуха парциальное давление водяного пара достигнет значения p_0 давления насыщенного пара уже при сжатии объема в два раза, а при дальнейшем сжатии будет выпадать роса. В результате парциальное давление водяного пара в конечном состоянии равно p_0.
- В конечном состоянии масса выпавшей росы составит половину исходной массы водяного пара. Объем этой массы воды ничтожен. Поэтому сухому воздуху в

конечном состоянии доступен практически весь объем $\frac{V}{4}$. При изотермическом сжатии сухого воздуха в 4 раза его давление, согласно закону Бойля–Мариотта, возрастет в 4 раза и составит

$$p_3 = 4p_2 = 4(p - \varphi p_0) = 4{,}0 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

- Давление в сосуде в конечном состоянии

$$p_{\text{конечн}} = p_3 + p_0 = 4(p - \varphi p_0) + p_0 = 5{,}0 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$