

Пары. Влажность

(Лекция 7 в 2015-2016 учебном году).

Насыщенные и ненасыщенные пары. Влажность.

Как уже говорилось ранее, в жидкости (или твердом теле) молекулы движутся с самыми разными величинами скоростей. В результате при любой температуре существует некоторое количество «быстрых» молекул, кинетическая энергия которых превышает модуль потенциальной энергии их связи с остальными частицами вещества. Если такие молекулы оказываются вблизи поверхности, то они могут преодолеть притяжение остальных молекул и вылететь за пределы жидкости (или твердого тела), образуя над ней **пар**. Процесс превращения жидкости или твердого тела в пар называется **парообразованием или испарением**. Испарение твердых тел также часто называют **возгонкой или сублимацией**. Процесс испарения происходит при всех температурах, при которых существует жидкая или твердая фазы данного вещества. Однако, с ростом температуры количество «быстрых» молекул и, следовательно, интенсивность процесса испарения быстро возрастают.

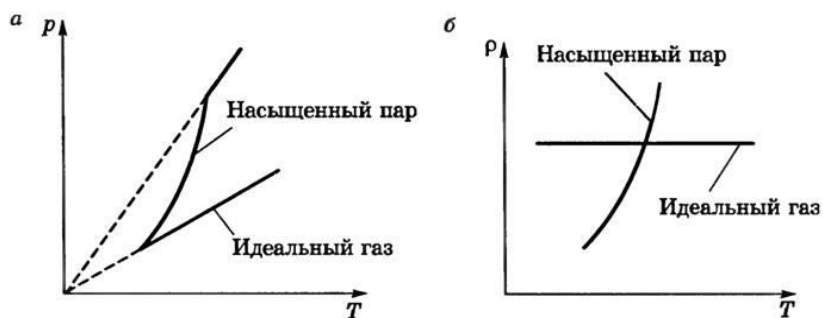
С другой стороны, молекулы пара движутся над жидкостью (или твердым телом) хаотически, поэтому часть из них попадает обратно в жидкость. При этом количество вернувшихся молекул при фиксированной температуре, очевидно, тем больше, чем больше концентрация молекул в паре. Процесс превращения пара в жидкость называется **конденсацией** (процесс превращения пара в твердое тело, обычно называют **кристаллизацией из пара**). Если интенсивности процессов испарения и конденсации равны, то количество пара и жидкости не меняется. В этом случае говорят, что пар и жидкость находятся в **динамическом равновесии**. Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью (или твердым телом), называется **насыщенным паром**. Заметим, что интенсивность процесса конденсации пара зависит только от концентрации молекул пара и его температуры (см. формулу (а20, лекция 5) для средней плотности числа ударов молекул газа о стенку в единицу времени), а интенсивность процесса испарения зависит только от температуры и резко возрастает с ее ростом. Поэтому концентрация молекул в насыщенном паре $n_{\text{нас}}(T)$ зависит только от температуры жидкости (твердого тела), причем с ростом температуры величина $n_{\text{нас}}$ быстро растет. При этом оказывается, что насыщенный пар, как правило, хорошо описывается уравнением Клапейрона-Менделеева:

$$P_{\text{нас}}V = mRT/\mu \quad \text{или} \quad P_{\text{нас}} = n_{\text{нас}}(T)kT \quad (1)$$

Из второго уравнения в (1) сразу видно, что давление насыщенного пара так же, как и концентрация молекул, зависит только от температуры пара, причем нелинейно. Из (1), зная давление насыщенного пара, можно, в частности, найти его плотность $\rho_{\text{нас}}$ и массу m в фиксированном объеме V , которые также возрастают с ростом температуры пара:

$$m = \mu P_{\text{нас}}(T)V/(RT) = \mu n_{\text{нас}}(T)V/N_A, \quad \rho_{\text{нас}} = \mu P_{\text{нас}}(T)/(RT) = \mu n_{\text{нас}}(T)/N_A. \quad (2)$$

Таким образом, **массу насыщенного пара в закрытом сосуде нельзя считать постоянной**. В этом заключается основное отличие насыщенного пара от обычного газа. Конкретные зависимости давления и (или) плотности насыщенного пара от температуры различны



для разных веществ и могут быть найдены из справочных таблиц. Качественно эти зависимости показаны на рисунках, где для сравнения приведены также графики изменения давления при изохорическом нагревании идеального газа.

Пар, давление которого ниже давления насыщенного пара при данной температуре называется **ненасыщенным** (или перегретым). Такой пар может находиться в равновесном состоянии, только не контактируя со своей жидкостью (или твердым телом). В этом случае он обычно хорошо подчиняется всем законам идеального газа.

Абсолютной влажностью называют выраженное в граммах количество водяного пара в одном кубическом метре воздуха.

Относительной влажностью воздуха называется выраженное в процентах отношение парциального давления $P_{\text{пара}}$ паров воды в данных условиях к давлению насыщенного водяного пара $P_{\text{нас}}$ при данной температуре:

$$r = (P_{\text{пара}}/P_{\text{нас}}) \cdot 100\%. \quad (3)$$

По определению, относительная влажность насыщенного пара составляет 100 %.

В метеорологии влажность воздуха часто характеризуют также температурой **изобарической точки росы**, т.е. температурой, при которой воздух, если его **изобарически** охладить, будет иметь относительную влажность 100%, а при дальнейшем охлаждении выпадет роса.

Пример 1. Найти изобарическую точку росы для воздуха, имеющего при температуре T относительную влажность r процентов.

Решение. Воздух является смесью газов и водяного пара. При его изобарическом охлаждении, когда $P_0 = \nu \cdot R \cdot T/V = \text{const}$ (здесь ν — число молей воздуха, находящегося в некотором объеме V), парциальные давления всех компонент воздуха не меняются до тех пор, пока не меняется их процентное содержание. Действительно, например, парциальное давление паров воды $P_{\text{пара}} = \nu_{\text{пара}} \cdot R \cdot T/V = \nu_{\text{пара}} \cdot P_0/\nu = \text{const}$ до начала образования росы. Поэтому водяной пар станет насыщенным при такой температуре τ (изобарическая точка росы), при которой $P_{\text{пара}} = P_{\text{нас}}(\tau)$. Но по условию $P_{\text{пара}} = r \cdot P_{\text{нас}}(T)/100\%$. Таким образом изобарическую точку росы τ можно найти пользуясь таблицей зависимости давления насыщенного пара от температуры и формулой $P_{\text{нас}}(\tau) = r \cdot P_{\text{нас}}(T)/100\%$.

Температура, при которой относительная влажность воздуха становится равной 100% в результате **изохорического** охлаждения, называют **изохорической точкой росы**. При охлаждении до этой температуры герметично закрытой банки с влажным воздухом на ее стенках выпадет роса.

Пример 2. Найдите формулу для расчета изохорической точки росы воздуха, имеющего при температуре T относительную влажность g процентов.

Решение. 1 способ. Т.к. до начала конденсации масса пара в сосуде не меняется, то его плотность (в условиях постоянного объема) сохраняется. Пар начнет конденсироваться, когда его плотность станет равной плотности насыщенного пара. Таким образом, уравнение для нахождения изохорической точки росы имеет вид: $\rho_{\text{нас}}(\tau_v) = g \cdot \rho_{\text{нас}}(T)/100\%$, где $\rho_{\text{нас}}(t)$ – плотность насыщенного пара при температуре t . **2 способ.** До начала конденсации число молей водяного пара не меняется. Поэтому при изохорическом охлаждении воздуха с водяными парами для парциального давления водяных паров имеем: $P_{\text{пара}}(T) = \nu_{\text{пара}} \cdot R \cdot T/V$, $P_{\text{пара}}(\tau_v) = \nu_{\text{пара}} \cdot R \cdot \tau_v/V$, где τ_v – температура изохорической точки росы, т.е. $P_{\text{пара}}(\tau_v) = P_{\text{нас}}(\tau_v)$. По условию $P_{\text{пара}}(T) = g \cdot P_{\text{нас}}(T)/100\%$. Таким образом, $P_{\text{нас}}(\tau_v)/\tau_v = P_{\text{пара}}(T)/T = g \cdot P_{\text{нас}}(T)/(T \cdot 100\%)$. Учитывая, что плотность пара $\rho(T) = m/V = \mu \cdot P/(R \cdot T)$, результаты, полученные двумя способами решения, естественно эквивалентны.