

Насыщенные и ненасыщенные пары. Влажность.

Как отмечалось в первом задании, в жидкости (или твердом теле) 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 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**. Т.к. интенсивность процесса конденсации пара пропорциональна концентрации молекул пара, а интенсивность процесса испарения зависит только от температуры и резко возрастает с ее ростом, то концентрация молекул в насыщенном паре $n_{\text{нас}}(T)$ зависит только от температуры жидкости (твердого тела). Причем с ростом температуры величина $n_{\text{нас}}$ и, следовательно, плотность и давление насыщенного пара быстро растут. Конкретные зависимости давления и плотности насыщенного пара от температуры различны для разных веществ и могут быть найдены из справочных таблиц. При этом оказывается, что насыщенный пар, как правило, хорошо описывается уравнением Клайперона-Менделеева, из которого, зная давление насыщенного пара, можно найти его плотность $\rho_{\text{нас}}$ и массу m в объеме V :

$$m = \mu \cdot P_{\text{нас}}(T) \cdot V / (R \cdot T), \quad \rho_{\text{нас}} = \mu \cdot P_{\text{нас}}(T) / (R \cdot T).$$

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.

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:

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

По определению, относительная влажность насыщенного пара составляет 100 %.

Пример 1. В комнате объемом $V = 120 \text{ м}^3$ при температуре $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ относительная влажность воздуха равна $r = 60 \%$. Определите массу водяных паров в воздухе комнаты, если давление насыщенного водяного пара при температуре $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ равна $P_{\text{нас}} = 1,7 \text{ кПа}$.

Решение. Массу водяных паров в воздухе комнаты найдем из уравнения Клайперона-Менделеева: $m = \mu \cdot P \cdot V / (R \cdot T)$, где $T = 288 \text{ К}$, $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $P = r \cdot P_{\text{нас}} / 100\%$. Таким образом, $m = \mu \cdot r \cdot P_{\text{нас}} \cdot V / (R \cdot T \cdot 100\%) = 0,92 \text{ кг}$.

Пример 2. В двух баллонах емкостью $V_1 = 2 \text{ м}^3$ и $V_2 = 6 \text{ м}^3$ находится влажный воздух при одинаковой температуре. Относительная влажность воздуха в первом баллоне $r_1 = 40 \%$, а во втором — $r_2 = 20 \%$. Какой будет относительная влажность в баллонах, если их соединить друг с другом, а температуру оставить прежней.

Решение. Парциальные давления паров воды в первом и втором сосудах, очевидно, равны $P_1 = r_1 \cdot P_{\text{нас}}$ и $P_2 = r_2 \cdot P_{\text{нас}}$, соответственно. Для них можно записать уравнение Клайперона-Менделеева:

$$r_1 \cdot P_{\text{нас}} \cdot V_1 = v_1 \cdot R \cdot T \quad \text{и} \quad r_2 \cdot P_{\text{нас}} \cdot V_2 = v_2 \cdot R \cdot T,$$

где v_1 и v_2 — число молей паров воды в первом и втором сосудах. После соединения сосудов имеем:

$$r \cdot P_{\text{нас}} \cdot (V_1 + V_2) = (v_1 + v_2) \cdot R \cdot T = (r_1 \cdot V_1 + r_2 \cdot V_2) \cdot P_{\text{нас}}.$$

Откуда $r = (r_1 \cdot V_1 + r_2 \cdot V_2) / (V_1 + V_2) = 25 \%$.

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 3. 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.

Кипение. Удельная теплота парообразования.

Если жидкость в сосуде нагревать при постоянном внешнем давлении, то сначала испарение идет лишь со свободной поверхности жидкости. При достижении определенной температуры образование пара начинает происходить по всему объему жидкости. Внутри жидкости возникают, растут и поднимаются на поверхность пузырьки пара. Процесс парообразования приобретает бурный характер. Это явление называется **кипением**, а температура, при которой оно происходит — **температурой кипения**. Итак, **кипение — это процесс парообразования, идущий по всему объему жидкости**.

По существу кипение есть *особый вид испарения*. Дело в том, что в жидкости всегда имеются пузырьки воздуха или других газов, часто настолько малые, что они невидимы невооруженным глазом. Часть пузырьков также скапливается на дне и стенках сосуда. В этих пузырьках, естественно, присутствует и насыщенный пар. Если нагреть жидкость до такой температуры, при которой давление насыщенного пара превосходит давление на пузырек со стороны жидкости, то пузырек начнет расти за счет испарения жидкости с его внутренней поверхности и быстро подниматься вверх под действием силы Архимеда. Т.е. начинается процесс кипения. Таким образом, **кипение возникает при такой температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках равно давлению на пузырек со стороны жидкости**. Последнее обычно определяется в основном внешним давлением на жидкость. Поэтому часто говорят, что кипение это процесс испарения жидкости в условиях, когда внешнее давление равно давлению насыщенного пара. Поскольку давление насыщенного пара растет с ростом температуры, то и температура кипения повышается при увеличении внешнего давления. Заметим, что по определению шкалы температур Цельсия при *нормальном* атмосферном давлении ($P_{\text{внеш}} = 1,01 \cdot 10^5$ Па) чистая вода кипит при температуре $t = 100^\circ\text{C}$. Это означает, что при этой температуре давление насыщенных водяных паров равно нормальному атмосферному давлению.

Важной особенностью кипения является то, что в процессе кипения температура жидкости остается постоянной, несмотря на продолжающийся подвод тепла. Это объясняется тем, что даже небольшое превышение температуры жидкости над температурой кипения приводит к значительному превышению давления насыщенных паров над внешним давлением. Это резко ускоряет процесс роста пузырьков с паром внутри жидкости. В результате подводимое тепло расходуется на процесс парообразования, а температура жидкости остается практически постоянной.

Молярной теплотой испарения (парообразования) при температуре T называют *количество теплоты*, которое необходимо сообщить одному молю вещества в жидкой фазе, чтобы изотермически испарить его при внешнем давлении, равном давлению насыщенного пара при температуре T (т.е. испарить его в процессе кипения).

Заметим, что если при тех же условиях происходит не парообразование, а обратный процесс (конденсация пара в жидкость), то он сопровождается выделением такого же количества теплоты.

Указание на то, при каком давлении происходит испарение, нужно потому, что подводимая теплота частично идет на работу по расширению пара, совершаемую против сил внешнего давления. Так при кипении воды при нормальном давлении на такую работу

расходуется около 7% от теплоты испарения. Остальная часть теплоты идет на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул. Дело в том, что средняя потенциальная энергия взаимодействия молекул в газе близка к нулю, а в жидкости – отрицательна. Что касается средней кинетической энергии молекул, то она зависит только от температуры и не зависит от агрегатного состояния вещества.

Из изложенного следует, что кипение возможно только тогда, когда внутри жидкости имеются пузырьки газа. Если же таковых нет, то парообразование внутри жидкости становится невозможным. Такую жидкость можно нагреть выше температуры кипения. Жидкость, температура которой при заданном внешнем давлении превосходит температуру кипения, называется **перегретой**.

Фазовые переходы.

Почти все вещества могут находиться в трех агрегатных состояниях: газообразном, жидком и твердом. При этом под твердым состоянием подразумевается кристаллическое состояние. В аморфном (неупорядоченном) состоянии характер движения атомов и молекул аналогичен движению атомов и молекул в жидкостях. В последнее время четвертым состоянием вещества часто называют плазму: газ, состоящий из заряженных частиц (ионов и электронов). Вещества могут переходить из одного состояния в другое в зависимости от физических условий, главным образом от температуры и давления. Такие процессы обычно называют фазовыми переходами. Дело в том, что в современной физике вместо понятия агрегатного состояния чаще пользуются более широким понятием фазы.

Фаза — это равновесное состояние вещества, существенно отличающееся по своим физическим свойствам от других состояний того же вещества. Так, например, углерод может находиться в двух кристаллических фазах – графит и алмаз.

Фазовым переходом называется переход вещества из одной фазы в другую. При таких переходах могут меняться по отдельности или вместе механические, тепловые, электрические и магнитные свойства вещества.

Мы уже достаточно подробно познакомились с таким фазовыми переходами как испарение и конденсация, а также с понятием теплоты испарения. Аналогично, **плавлением** называется *процесс перехода* вещества из кристаллического состояния в жидкое состояние. Также как и кипение, плавление требует подвода теплоты и происходит при определенной температуре, называемой температурой плавления, которая зависит от внешнего давления.

Удельной теплотой плавления называется *количество теплоты*, которое необходимо сообщить одному килограмму вещества в кристаллической фазе при температуре плавления для перевода его в жидкое состояние.

Обратный процесс перехода вещества из жидкого состояния в кристаллическое называется **кристаллизацией** (или затвердеванием) и сопровождается выделением такого же количества теплоты, которое требуется на его плавление.

Пример 4. В колбе находилась вода при температуре 0 °С. Выкачивая из колбы воздух, воду в колбе заморозили посредством собственного испарения. Какая часть воды

при этом испарилась, если притока тепла извне не было? Удельная теплота испарения при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $r = 2,543\text{ МДж/кг}$, удельная теплота плавления льда $\lambda = 0,335\text{ МДж/кг}$.

Решение. Если испарилось m_1 воды, то замёрзла вся остальная вода: $m - m_1$. Необходимое для образования пара тепло может быть получено только за счет теплоты, выделяющейся при замерзании воды, т.е. $r \cdot m_1 = \lambda \cdot (m - m_1)$, откуда $m_1/m = \lambda/(\lambda + r) = 0,12$.

Пример 5. Установка, выделяющая мощность $N = 30\text{ кВт}$, охлаждается проточной водой, текущей по спиральной трубке диаметром $d = 15\text{ мм}$. При установившемся режиме проточная вода нагревается на $\Delta t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определить скорость течения воды, предполагая, что вся выделяемая установкой мощность идет на нагрев воды. Удельная теплоемкость воды $C = 4200\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Решение. В условиях задачи все тепло $N \cdot \tau$, выделенное установкой за время τ , пошло на нагрев воды, прошедшей через установку за это же время: $N \cdot \tau = m \cdot C \cdot \Delta t$. Но $m = \rho \cdot V$, где ρ — плотность воды, $V = v \cdot \tau \cdot S$ — объем воды, зашедшей в установку (и вышедшей из нее) за время τ (v — скорость течения воды, $S = \pi \cdot d^2/4$ — площадь поперечного сечения трубки). Отсюда искомая скорость $v = 4 \cdot N / (C \cdot \rho \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \Delta t) = 2,7\text{ м/с}$.

Пример 6. В сосуд Дьюара поместили $V = 2\text{ л}$ жидкого азота при температуре $t_1 = -195\text{ }^{\circ}\text{C}$. За одни сутки ($\tau_{\text{аз}} = 24\text{ ч}$) испарилась половина азота. Определить удельную теплоту испарения азота, если известно, что при температуре $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в том же сосуде за время $\tau_{\text{л}} = 22,5\text{ ч}$ тает $m = 40\text{ г}$ льда. Температура окружающего воздуха $t_2 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плотность жидкого азота $\rho = 800\text{ кг/м}^3$; удельная теплота плавления льда $\lambda = 0,335\text{ МДж/кг}$. Считать, что мощность подвода тепла внутрь сосуда пропорциональна разности температур снаружи и внутри сосуда.

Решение. Количества теплоты подведенные ко льду и азоту соответственно равны $Q_{\text{л}} = \lambda \cdot m = k \cdot (t_2 - t) \cdot \tau_{\text{л}}$ и $Q_{\text{аз}} = r \cdot (0,5 \cdot \rho \cdot V) = k \cdot (t_1 - t) \cdot \tau_{\text{аз}}$, где k — коэффициент пропорциональности между мощностью подвода тепла внутрь сосуда и разностью температур снаружи и внутри сосуда. Отсюда $r = \lambda \cdot m \cdot (t_1 - t) \cdot \tau_{\text{аз}} / (0,5 \cdot \rho \cdot V \cdot (t_2 - t) \cdot \tau_{\text{л}}) = 0,19\text{ МДж/кг}$.

Контрольные вопросы.

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

2. Докажите, что температура изохорической точки росы всегда ниже температуры изобарической точки росы.

3. В герметически закрытом сосуде объемом $V = 1,1\text{ л}$ находится $m = 100\text{ г}$ воды и её пары при температуре $t = 100^{\circ}\text{C}$. Найти массу пара.

4. Смешали две порции влажного воздуха одинаковой температуры. В одной порции воздух имел относительную влажность $g_1 = 20\%$ и занимал объем $V_1 = 2\text{ м}^3$, в другой — влажность $g_2 = 10\%$ и объем $V_2 = 1\text{ м}^3$. Объем смеси, не изменяя температуру, сделали равным $V = 2,5\text{ м}^3$. Чему равна относительная влажность воздуха в конечном состоянии?

5. В каком максимальном диапазоне температур можно пользоваться ртутным термометром?

6. В кастрюлю налили горячей воды с температурой $t = 97\text{ }^\circ\text{C}$ и поставили на плиту. Через время $\tau = 20\text{ с}$ вода закипела. Через какое время после этого вода полностью испарится? Удельная теплоемкость воды $C = 4200\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, удельная теплота парообразования $\lambda = 2,3\text{ МДж/кг}$. Теплоемкостью кастрюли по сравнению с теплоемкостью воды можно пренебречь. Считать, что мощность плиты и мощность тепловых потерь не зависят от времени.

7. Пробирку с $m = 100\text{ г}$ перегретой воды при $T = 382\text{ К}$ и нормальном атмосферном давлении слегка встряхивают, отчего происходит бурное вскипание воды. Найдите массу выкипевшей воды. Удельная теплоемкость воды $C = 4200\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, удельная теплота парообразования воды $\lambda = 2,3\text{ МДж/кг}$.

Контрольные задачи.

1. Под колоколом насоса находится стакан, содержащий $m = 10\text{ г}$ воды. Скорость откачки насоса $v = 30\text{ л/мин}$. Через какое минимальное время вся вода испарится, если установившаяся температура воды $t = 5\text{ }^\circ\text{C}$? Давление насыщенного пара при $5\text{ }^\circ\text{C}$ $P_{\text{нас}} = 870\text{ Па}$.

2. В сосуде объемом $V = 100\text{ л}$ при температуре $t = 30\text{ }^\circ\text{C}$ находится воздух с относительной влажностью $g = 30\text{ \%}$. Чему станет равна относительная влажность воздуха, если в этот сосуд ввести $m = 1\text{ г}$ воды? Температуру воздуха считать постоянной. Давление насыщенного пара воды при этой температуре $P_{\text{нас}} = 4,24\text{ кПа}$.

3. В теплоизолированном сосуде находится насыщенный водяной пар. Через сосуд по змеевику пропускается холодная вода. Температура воды на входе равна $t_0 = 18\text{ }^\circ\text{C}$. Если пропускать воду со скоростью $v_1 = 3\text{ м/с}$, то ее температура на выходе равна $t_1 = 68\text{ }^\circ\text{C}$. Если пропускать воду со скоростью $v_2 = 6\text{ м/с}$, то масса пара, конденсирующегося на змеевике, оказывается такой же, как в первом случае. Чему равна при этом температура воды на выходе?

4. В термостат, содержащий $m = 0,5\text{ кг}$ воды при температуре $t_1 = 10\text{ }^\circ\text{C}$, поступает водяной пар при температуре $t_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью $\delta = 10^{-5}\text{ кг/с}$. Через какое время температура воды станет равной $t_3 = 20\text{ }^\circ\text{C}$. Удельная теплоемкость воды $C = 4200\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, удельная теплота парообразования воды $\lambda = 2,3\text{ МДж/кг}$.

5. В открытый калориметр с водой, имеющей температуру $T_0 = 273\text{ К}$, погружают кусок алюминия массой $m = 0,1\text{ кг}$, нагретый до температуры $T_1 = 778\text{ К}$. При этом температура воды в калориметре повышается до $T = 278\text{ К}$, а часть её выкипает. Определите массу выкипевшей воды, если первоначально в калориметре находилось $M = 1\text{ кг}$ воды. Удельная теплоемкость воды и алюминия равны $C = 4200\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ и $C_{\text{ал}} = 920\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ соответственно. Удельная теплота парообразования воды $\lambda = 2,3\text{ МДж/кг}$. Теплоемкостью калориметра пренебречь.

6. В замкнутом сосуде находился газообразный азот при комнатной температуре $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $P_0 = 1\text{ атм}$. В сосуд впрыснули некоторое количество жидкого азота с

температурой $t_1 = -196\text{ }^\circ\text{C}$ (температура кипения при давлении 1 атм). Жидкий азот быстро испарился, после чего температура в сосуде стала $t_2 = -140\text{ }^\circ\text{C}$. После того, как сосуд прогрелся до комнатной температуры, в нем установилось давление $P = 1,5\text{ атм}$. Определите молярную теплоту испарения жидкого азота. Молярная теплоемкость газообразного азота при постоянном объеме $C_V = 20,8\text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$.

7. В кастрюлю налили $m = 2\text{ кг}$ горячей воды с температурой $t = 97\text{ }^\circ\text{C}$ и поставили на плиту. Через время $\tau = 20\text{ с}$ вода закипела. Через какое время после этого вода полностью испарится? Удельная теплоемкость воды $C = 4200\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, удельная теплота парообразования $\lambda = 2,3\text{ МДж/кг}$. Теплоемкость кастрюли $C_1 = 1800\text{ Дж/К}$. Считать, что мощность плиты и мощность тепловых потерь не зависят от времени.