

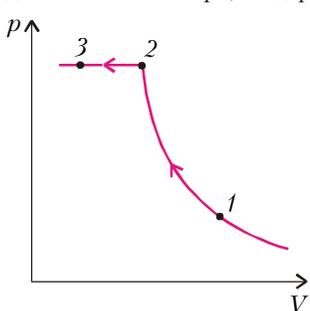
# Водяные пары

**А. ШЕРОНОВ**

**ПАРЫ ВОДЫ ВСТРЕЧАЮТСЯ В ОСНОВНОМ В ЗАДАЧАХ** двух типов.

В одних задачах пар, наряду с другими идеальными газами, является участником различных газовых процессов. Уравнение состояния идеального газа, в том числе и смеси различных газов, имеет вид  $p = nkT$ , где  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $k$  – постоянная Больцмана, а  $n$  – суммарная концентрация частиц (атомов или молекул). В этом уравнении индивидуальные свойства газов, такие как масса молекул или атомов, их размер и т.д., отсутствуют. Парциальное давление водяного пара  $p_{\text{п}}$  в смеси газов определяется той же формулой:  $p_{\text{п}} = n_{\text{п}}kT$ , где  $n_{\text{п}}$  – концентрация молекул пара.

Но, в отличие от других газов, пары обладают и определенной особенностью, которая отчетливо проявляется, если рассмотреть процесс изотермического изменения объема данной массы пара, содержащегося в некотором объеме.



Уменьшая объем, занимаемый паром, мы обнаружим, что при определенной (для данной температуры  $T_0$ ) концентрации  $n_{\text{п}}$ , соответствующей состоянию 2 на диаграмме  $p$ – $V$  (см. рисунок), дальнейшего роста концентрации и, следовательно, роста парциального давления пара не происходит – пар становится насыщенным. Взаимодействие молекул пара

в этом состоянии настолько значительно, что дальнейшее уменьшение объема приводит к их слипанию – пар начинает превращаться в жидкость или, как говорят, конденсируется. Эта конденсация происходит при постоянной температуре, а значит, и при постоянном давлении, которое у насыщенного пара зависит только от температуры. Отметим, что если при уменьшении объема от  $V_2$  до  $V_3$  (см. диаграмму) сконденсировалась масса пара  $m_{\text{п}}$ , из которой образовалась жидкость той же массы, то справедливо равенство

$$p_{\text{п}}(V_2 - V_3) = \frac{m_{\text{п}}}{M} RT_0,$$

где  $M$  – молярная масса пара. Это равенство в дальнейшем мы будем неоднократно использовать.

Напомним также, что давление насыщенного пара чрезвычайно сильно зависит от его температуры. Так, при  $0^\circ\text{C}$  ( $T = 273\text{ K}$ ) это давление составляет 4 мм рт.ст., при температуре  $20^\circ\text{C}$  ( $293\text{ K}$ ) оно уже в 5 раз больше, т.е. составляет 20 мм рт.ст., а при  $100^\circ\text{C}$  ( $373\text{ K}$ ) оно достигает 760 мм рт.ст. (1 атм). Таким образом, при изменении температуры от 273 К до 373 К давление насыщенного пара увеличивается в 190 раз. В задачах, связанных с насыщенным паром, его давление при  $100^\circ\text{C}$  обычно считается известным, равным 1 атм, или 760 мм рт.ст.

Другой тип задач связан с участием водяного пара в различных процессах отвода или подвода тепла. Пока пар остается ненасыщенным, он участвует в этих процессах как обычный трехатомный идеальный газ. В частности, внутрен-

няя энергия  $\nu$  молей водяного пара равна  $U = \nu \cdot 3RT$ , а молярная теплоемкость при постоянном объеме равна  $C_V = 3R$ . Если же пар становится насыщенным и происходит его конденсация или, напротив, жидкость испаряется, задача усложняется. В частности, количество теплоты, которое необходимо подводить для испарения жидкости или которое выделяется при конденсации пара, зависит от условий протекания этих процессов.

Согласно первому началу термодинамики, удельная теплота испарения  $r = \Delta U + A$ , где  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии системы жидкость–пар,  $A$  – работа пара против внешних сил. Обычно в процессе подвода или отвода тепла при испарении или конденсации сохраняются постоянными давление и температура (табличные данные теплот испарения различных жидкостей приводятся именно при этих условиях). Изменение внутренней энергии  $\Delta U$  связано в основном с изменением потенциальной энергии взаимодействия молекул вещества в жидком и газообразном состояниях. Работа  $A$  может быть рассчитана с помощью уравнения состояния. Так, для испарения  $m = 1\text{ г}$  воды при температуре  $T = 373\text{ K}$  и давлении насыщенного пара  $p_{\text{п}} = 10^5\text{ Па}$  необходимо подвести количество теплоты  $r = 2260\text{ Дж/г}$ . Работа пара против внешних сил, поддерживающих постоянное давление, равна  $A = p_{\text{п}}(V_{\text{к}} - V_0)$ , где  $V_0$  – начальный объем, который занимает 1 г воды при  $100^\circ\text{C}$  (т.е.  $1\text{ см}^3$ ),  $V_{\text{к}}$  – конечный объем, который занимает 1 г пара при  $100^\circ\text{C}$ . По уравнению состояния, плотность пара при комнатных температурах ( $\sim 300\text{ K}$ ) примерно в тысячу раз меньше плотности воды (т.е.  $1\text{ г/см}^3$ ), поэтому

$$A = p_{\text{п}}V_{\text{к}} = \frac{m}{M} RT \approx 170\text{ Дж}.$$

Таким образом, вклад работы против внешнего давления в теплоту испарения невелик ( $\sim 8\%$ ). Однако встречаются задачи, в которых его необходимо учитывать.

Ниже мы рассмотрим конкретные примеры задач двух указанных типов.

**Задача 1.** Летним днем перед грозой плотность влажного воздуха (масса пара и воздуха в  $1\text{ м}^3$ ) равна  $\rho = 1140\text{ г/м}^3$  при давлении  $p = 100\text{ кПа}$  и температуре  $t = 30^\circ\text{C}$ . Найдите отношение парциального давления водяного пара, содержащегося в воздухе, к парциальному давлению сухого воздуха. Принять, что молярные массы воздуха и пара равны  $M_{\text{в}} = 29\text{ г/моль}$  и  $M_{\text{п}} = 18\text{ г/моль}$  соответственно. Универсальная газовая постоянная  $R = 8,31\text{ Дж/(моль} \cdot \text{K)}$ .

Давление влажного воздуха складывается из парциальных давлений сухого воздуха и пара:

$$p = p_{\text{в}} + p_{\text{п}}.$$

Плотность влажного воздуха равна

$$\rho = \rho_{\text{в}} + \rho_{\text{п}},$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха, а  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пара. По уравнению состояния,

$$p_{\text{п}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} RT \quad \text{и} \quad p = \frac{\rho_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} RT.$$

Решая совместно все эти уравнения, получим

$$\rho_{\text{в}} = \frac{\rho M_{\text{в}} - \rho_{\text{п}} M_{\text{п}} M_{\text{в}} / (RT)}{M_{\text{в}} - M_{\text{п}}}, \quad \rho_{\text{п}} = \frac{\rho M_{\text{п}} M_{\text{в}} / (RT) - \rho M_{\text{п}}}{M_{\text{в}} - M_{\text{п}}}.$$