

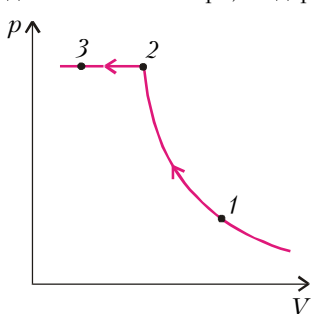
# Водяные пары

**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

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

Из уравнения состояния найдем

$$\frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{в}}} = \frac{M_{\text{в}} \rho_{\text{п}}}{M_{\text{п}} \rho_{\text{в}}},$$

или окончательно

$$\frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{в}}} = \frac{1 - \rho M_{\text{в}} / (RT\rho)}{\rho M_{\text{п}} / (RT\rho) - 1} \approx \frac{1}{37}.$$

Заметим, как это следует из таблиц, что пар в условиях задачи оказывается в состоянии, близком к насыщению. Кроме того, расчетная величина отношения давлений пара и воздуха оказывается чрезвычайно чувствительной к численным значениям величин, входящих в условия задачи. Это связано с тем, что на фоне достаточно большого давления воздуха мы хотим оценить вклад сравнительно небольшого давления пара.

**Задача 2.** В парной бани относительная влажность воздуха составляла  $\phi_1 = 50\%$  при температуре  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ . После того как температура воздуха уменьшилась до  $t_2 = 97^\circ\text{C}$  и пар «осел», относительная влажность воздуха стала  $\phi_2 = 45\%$ . Какая масса воды выделилась из влажного воздуха парной, если ее объем  $V = 30 \text{ м}^3$ ? Известно, что при температуре  $t_2$  давление насыщенного пара на 80 мм рт.ст. меньше, чем при  $t_1$ .

Давление насыщенного пара при  $100^\circ\text{C}$  составляет  $p_{1\text{п}} = 760 \text{ мм рт.ст.} = 10^5 \text{ Па}$ , а при  $97^\circ\text{C}$  —  $p_{2\text{п}} = 680 \text{ мм рт.ст.}$  По уравнению состояния, массы пара в парной равны, соответственно,

$$m_1 = \frac{\phi_1 p_{1\text{п}} V M_{\text{п}}}{RT_1 \cdot 100\%} \text{ и } m_2 = \frac{\phi_2 p_{2\text{п}} V M_{\text{п}}}{RT_2 \cdot 100\%},$$

где  $M_{\text{п}} = 18 \text{ г/моль}$  — молярная масса пара. Значит, из влажного воздуха сконденсировалась масса воды

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{V M_{\text{п}}}{R \cdot 100\%} \left( \frac{\phi_1 p_{1\text{п}}}{T_1} - \frac{\phi_2 p_{2\text{п}}}{T_2} \right) \approx 1,6 \text{ кг}.$$

**Задача 3.** В цилиндре под поршнем с пружиной заперты водяной пар и вода, масса которой  $M = 1 \text{ г}$ . Температура в цилиндре поддерживается постоянной и равной  $100^\circ\text{C}$ . Когда из цилиндра выпустили часть пара массой  $m = 7 \text{ г}$ , поршень стал двигаться. После установления равновесия объем содержимого в цилиндре под поршнем оказался в 2 раза меньше первоначального. Какая масса пара была в цилиндре и какой объем он занимал в начале опыта? Поршень занимает положение равновесия у дна цилиндра, когда пружина не напряжена.

Вода вначале занимала объем  $1 \text{ см}^3$ , тогда как пар, по уравнению состояния, занимал объем не меньше 12 л, так что объемом, занимаемым водой можно пренебречь. Пар в начале насыщенный (в цилиндре есть вода), и его давление равно  $p_{1\text{п}} = 10^5 \text{ Па}$ . В конце опыта давление пара составляло  $p_2 = 0,5 p_{1\text{п}} = 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , там как сила, действующая со стороны пружины на поршень, уменьшилась вдвое. Вся вода при этом испарилась, поскольку поршень перестал двигаться, и пар стал ненасыщенным.

Пусть начальная масса пара равна  $m_{\text{п}}$ . Тогда в начале опыта

$$p_{1\text{п}} V = \frac{m_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} RT,$$

где  $M_{\text{п}}$  — молярная масса пара. В конце опыта

$$\frac{1}{2} p_{1\text{п}} \frac{V}{2} = \frac{m_{\text{п}} + M - m}{M_{\text{п}}} RT.$$

Из этих двух уравнений находим

$$m_{\text{п}} = \frac{4}{3}(m - M) = 8 \text{ г}.$$

Объем который занимал пар, равен

$$V = \frac{m_{\text{п}} RT}{M_{\text{п}} p_{1\text{п}}} = 13,8 \text{ л}.$$

**Задача 4.** В сосуде объемом  $V_1 = 20 \text{ л}$  находятся вода, насыщенный водяной пар и воздух. Объем сосуда при постоянной температуре медленно увеличивается до  $V_2 = 40 \text{ л}$ , давление в сосуде при этом уменьшается от  $p_1 = 3 \text{ атм}$  до  $p_2 = 2 \text{ атм}$ . Определите массу воды в сосуде в конце опыта, если общая масса воды и пара составляет  $m = 36 \text{ г}$ . Объемом, занимаемым жидкостью, в обоих случаях пренебречь.

Анализ изотермы для пара (см. рисунок) показывает, что во время опыта парциальное давление пара оставалось постоянным (в конце опыта, как и в начале, в сосуде была вода). Давление в сосуде менялось только за счет изменения давления воздуха. Так как при постоянной температуре объем, занимаемый воздухом, увеличился вдвое, то его давление в конце опыта уменьшилось тоже вдвое. Пусть в конце опыта в сосуде осталась масса пара  $m_{\text{п}2}$ . Так как пар оставался насыщенным при постоянном давлении и температуре, а объем его увеличился вдвое, то в начале опыта его масса в сосуде была  $m_{\text{п}1} = m_{\text{п}2}/2$ .

После этого предварительного анализа найдем давление пара  $p_{\text{п}}$  в сосуде. В начале опыта

$$p_{\text{п}} + p_{\text{в}} = p_1,$$

где  $p_{\text{в}}$  — давление воздуха в начале. В конце

$$p_{\text{п}} + \frac{p_{\text{в}}}{2} = p_2.$$

Следовательно,

$$p_{\text{п}} = 2p_2 - p_1 = 1 \text{ атм}.$$

Так как пар насыщенный, его температура равна  $100^\circ\text{C}$ . По уравнению состояния теперь можно найти массу пара в сосуде:

$$p_{\text{п}}(V_2 - V_1) = \frac{m_{\text{п}2} - m_{\text{п}1}}{M_{\text{п}}} RT = \frac{m_{\text{п}2}}{2M_{\text{п}}} RT,$$

где  $M_{\text{п}} = 18 \text{ г/моль}$  — молярная масса пара, откуда

$$m_{\text{п}2} = \frac{2M_{\text{п}} p_{\text{п}}}{RT} (V_2 - V_1) = 24 \text{ г}.$$

Итак, в сосуде осталась масса воды

$$m_{\text{в}} = m - m_{\text{п}2} = 12 \text{ г}.$$

**Задача 5.** Жидкость и ее насыщенный пар находятся в цилиндре под поршнем при некоторой температуре. При медленном изобарическом нагреве температура системы повысилась до  $100^\circ\text{C}$ , а объем увеличился на 54%. На сколько градусов нагрели содержимое цилиндра, если масса пара вначале составляла  $2/3$  от полной массы смеси? Начальным объемом жидкости по сравнению с объемом системы пренебречь.

Пусть массы пара и жидкости вначале были  $m_{\text{п}}$  и  $m_{\text{ж}}$ , а температура в сосуде была  $T_{\text{п}}$ . При изобарическом нагреве смеси ее температура не меняется, пока жидкость испаряется. По условию, температура повысилась до  $T_{\text{к}} = 373 \text{ К}$ , значит, вся жидкость испарилась (состояние 2 на рисунке)

и пар массой  $m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}$  при том же давлении нагрелся на  $\Delta T = T_{\text{к}} - T_{\text{н}}$ .

Запишем уравнения состояния для начального и конечного состояний системы:

$$pV_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} RT_{\text{н}},$$

$$pV_{\text{к}} = \frac{m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}}{M_{\text{п}}} RT_{\text{к}},$$

где  $M_{\text{п}}$  – молярная масса пара. По условию,

$$V_{\text{к}} = \beta V_{\text{п}} = 1,54 V_{\text{п}}$$

и

$$\frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}} = \alpha = \frac{2}{3}.$$

Из приведенных равенств находим

$$\frac{T_{\text{к}}}{T_{\text{н}}} = \beta \alpha,$$

и окончательно

$$\Delta T = T_{\text{к}} - T_{\text{н}} = T_{\text{к}} \frac{\beta \alpha - 1}{\beta \alpha} \approx 10 \text{ К}.$$

**Задача 6.** 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 массы жидкости  $m_{\text{ж}}$  к массе пара  $m_{\text{п}}$ , которые первоначально содержались в сосуде. Объемом, занимаемым жидкостью, пренебречь.

В изотермическом процессе давление уменьшается в 2 раза, а объем увеличивается в 3 раза. Следовательно, система жидкость–пар массой  $m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}$  из начального состояния, соответствующего состоянию 3 на рисунке, переходит в конечное, соответствующее состоянию 1 на том же рисунке. В промежуточном состоянии 2 вся жидкость испарилась при постоянном давлении  $p = p_{\text{пн}}$  и заняла объем  $V_2$ :

$$p_{\text{пн}} V_2 = \frac{m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}}{M_{\text{п}}} RT,$$

где  $M_{\text{п}}$  – молярная масса пара. В конечном состоянии 1 та же масса пара при давлении  $p_1 = p_{\text{пн}}/\alpha$  и той же температуре заняла объем  $V_1$ :

$$p_1 V_1 = \frac{m_{\text{ж}} + m_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} RT.$$

По условию задачи, в начальном состоянии пар массой  $m_{\text{п}}$  занимал объем  $V_3 = V_1/\beta$ :

$$p_{\text{пн}} V_3 = \frac{m_{\text{п}}}{M_{\text{п}}} RT.$$

Из этих равенств находим

$$V_1 = \alpha V_2,$$

$$\frac{m_{\text{п}} + m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = \frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1/\alpha}{V_1/\beta} = \frac{\beta}{\alpha}.$$

Тогда окончательно

$$\frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = \frac{\beta}{\alpha} - 1 = \frac{1}{2}.$$

**Задача 7.** В герметичный сосуд, содержащий сухой воздух при температуре  $17^\circ\text{C}$  и некотором давлении, впрысну-

ли немного воды и стали медленно нагревать содержимое. Определите давление воздуха в сосуде до впрыскивания воды, если к тому моменту, когда вся вода испарилась, давление воздуха составляло 46% от общего давления в сосуде. Начальный объем воды составил 1/1100 от объема сосуда. Универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ , молярная масса воды  $M = 18 \text{ г}/\text{моль}$ , плотность воды  $\rho = 1 \text{ г}/\text{см}^3$ .

Пусть объем сосуда  $V_0$ , тогда масса пара в конечном состоянии, равная начальной массе воды, составляет

$$m_{\text{п}} = \rho \frac{V_0}{1100}.$$

Запишем уравнение состояния для воздуха вначале:

$$p_{1\text{в}} V_0 = \frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} RT_1,$$

где  $M_{\text{в}}$  – молярная масса воздуха. В конечном состоянии пар и воздух занимают один и тот же объем и имеют одинаковую температуру. Поэтому их давления  $p_{\text{п}}$  и  $p_{2\text{в}}$  относятся, как соответствующие количества молей:

$$\frac{p_{\text{п}}}{p_{2\text{в}}} = \frac{m_{\text{п}} M_{\text{в}}}{m_{\text{в}} M}.$$

С другой стороны, по условию задачи,

$$\frac{p_{2\text{в}}}{p_{2\text{в}} + p_{\text{п}}} = \beta = 0,46.$$

Записанные равенства позволяют определить отношение масс пара и воздуха:

$$\frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{п}}} = \frac{\beta}{1 - \beta} \frac{M_{\text{в}}}{M}$$

и начальное давление воздуха в сосуде:

$$p_{1\text{в}} = \frac{m_{\text{в}}}{M_{\text{в}}} \frac{RT_1}{V_0} = \frac{RT_1}{V_0} \frac{\beta}{1 - \beta} \frac{m_{\text{п}}}{M} = RT_1 \frac{\beta}{1 - \beta} \frac{\rho}{M} \frac{1}{1100} \approx 10^5 \text{ Па}.$$

**Задача 8.** Вода и водяной пар находятся в цилиндре под поршнем при температуре  $110^\circ\text{C}$ , при этом вода занимает 0,1% объема цилиндра. При медленном изотермическом увеличении объема вода начинает испаряться. К моменту, когда она вся испарилась, пар совершил работу  $A = 177 \text{ Дж}$ , а объем, который он занимал, увеличился на  $\Delta V = 1,25 \text{ л}$ . Найдите давление, при котором производился опыт. Сколько воды и пара было в цилиндре в начальном состоянии?

Если  $V$  – объем цилиндра, то начальная масса воды равна

$$m_{\text{ж}} = \rho V \cdot 10^{-3},$$

где  $\rho = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$  – плотность воды. При постоянном давлении и температуре вода испарилась, и пар совершил работу

$$A = p \Delta V = \frac{m_{\text{ж}}}{M_{\text{п}}} RT,$$

где  $M_{\text{п}} = 18 \text{ г}/\text{моль}$  – молярная масса пара. Это равенство позволяет определить давление  $p$ , при котором проводился опыт:

$$p = \frac{A}{\Delta V} = 1,42 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

а затем и массу жидкости в начале опыта:

$$m_{\text{ж}} = \frac{AM_{\text{п}}}{RT} = 1 \text{ г}.$$

Начальную массу пара (пар занимал 99,9% объема цилинд-

ра) найдем по уравнению состояния:

$$pV = p \frac{m_{ж}}{\rho \cdot 10^{-3}} = \frac{m_{п}}{M_{п}} RT,$$

откуда

$$m_{п} = \frac{p m_{ж} M_{п}}{RT \rho \cdot 10^{-3}} = 0,8 \text{ г.}$$

**Задача 9.** В цилиндре под поршнем находится смесь  $v_{ж}$  молей жидкости и  $v_{п}$  молей ее насыщенного пара при температуре  $T$ . К содержимому цилиндра подвели количество теплоты  $Q$  при медленном изобарическом процессе, и температура внутри цилиндра увеличилась на  $\Delta T$ . Найдите изменение внутренней энергии содержимого цилиндра. Объемом, занимаемым жидкостью, пренебречь.

При медленном подводе тепла в изобарическом процессе температура не менялась, пока не испарилась вся жидкость. В дальнейшем температура пара в количестве  $v_{п} + v_{ж}$  увеличилась на  $\Delta T$ . По закону сохранения энергии,

$$Q = \Delta U + p(V_{к} - V_{п}),$$

где  $p(V_{к} - V_{п})$  – работа пара против внешнего давления. По уравнению состояния,

$$pV_{п} = v_{п} RT, \quad pV_{к} = (v_{п} + v_{ж})R(T + \Delta T).$$

Окончательно находим

$$\Delta U = Q - v_{ж} RT - (v_{п} + v_{ж})R\Delta T.$$

**Задача 10.** В цилиндре под поршнем находится один моль ненасыщенного пара при температуре  $T$ . Пар сжимают в изотермическом процессе так, что в конечном состоянии половина его массы сконденсировалась, а объем пара уменьшился в  $k = 4$  раза. Найдите молярную теплоту конденсации пара, если в указанном процессе от системы жидкость–пар пришлось отвести количество теплоты  $Q$  ( $Q > 0$ ). Пар можно считать идеальным газом.

Указание. Работа, совершаемая в изотермическом процессе  $v$  молями пара при расширении от объема  $V_1$  до  $V_2$

$$\text{равна } A = vRT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Конденсация пара начнется в состоянии 2 (см. рисунок), и в дальнейшем до конечного состояния 3 давление не меняется. Количество образовавшейся жидкости равно половине первоначального количества пара, т.е.  $v_{ж} = v_{п}/2$ . Количество теплоты, отведенное на участке 1–3, равно

$$Q_{13} = Q_{12} + Q_{23}.$$

На участке 1–2 пар остается ненасыщенным, его внутренняя энергия в изотермическом процессе не меняется, поэтому тепло отводится в количестве, равном работе сжатия внешних сил:

$$Q_{12} = v_{п} RT \ln \frac{V_1}{V_2}.$$

На участке 2–3 конденсация пара и выделение тепла происходят при постоянном давлении и температуре, и  $Q_{23} = \Lambda v_{ж}$ , где  $\Lambda$  – молярная теплота конденсации пара. Кроме того, для этого участка из уравнения состояния находим

$$p_2(V_2 - V_3) = v_{ж} RT.$$

Последнее равенство, уравнение состояния  $p_2 V_2 = v_{п} RT$  и условие  $V_1 = k V_3$  позволяют найти отношение объемов  $V_1/V_2$ :

$$\frac{V_1}{V_2} = k \frac{v_{п} - v_{ж}}{v_{п}}.$$

Таким образом, окончательно находим

$$Q_{13} = Q = v_{п} RT \ln \left( k \frac{v_{п} - v_{ж}}{v_{п}} \right) + \Lambda v_{ж},$$

откуда

$$\Lambda = 2Q - 2RT \ln 2.$$

**Упражнения**

**1.** После теплого летнего дождя относительная влажность воздуха достигла 100%. При этом плотность влажного воздуха (масса пара и воздуха в  $1 \text{ м}^3$ )  $\rho = 1171 \text{ г/м}^3$ , его давление  $p = 100 \text{ кПа}$  и температура  $t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ . Найдите по этим данным давление насыщенного пара при температуре  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ . Молярные массы воздуха и пара равны  $M_{в} = 29 \text{ г/моль}$  и  $M_{п} = 18 \text{ г/моль}$  соответственно, универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ .

**2.** В цилиндре под поршнем с пружиной заперт водяной пар в объеме  $V_1 = 4 \text{ л}$ . Температура в цилиндре поддерживается постоянной и равной  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . В цилиндр впрыскивается  $m = 4 \text{ г}$  воды, и поршень начинает перемещаться. После установления равновесия часть воды испарилась, а объем цилиндра увеличился в 2 раза. Какая масса пара была в цилиндре вначале? Сколько воды испарилось к концу опыта?

**3.** Влажный термометр психрометра, висящего в комнате, показывает температуру  $13 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{в} = 286 \text{ К}$ ). Сухой термометр этого психрометра показывает при этом температуру  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_{с} = 288 \text{ К}$ ). Какова относительная влажность воздуха в комнате? Сколько росы выпадет из каждого кубометра влажного воздуха комнаты, если температура в ней понизится и сухой термометр будет показывать температуру  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ? Давление насыщенного водяного пара при температуре  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  равно  $p = 12,8 \text{ мм рт.ст.}$  Также известно, что вблизи комнатной температуры малые относительные изменения давления насыщенного водяного пара  $\Delta p/p$  связаны с малыми относительными изменениями его температуры  $\Delta T/T$  соотношением  $\Delta p/p = 18 \Delta T/T$ .

**4.** Смесь воды и ее насыщенного пара занимает некоторый объем при температуре  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если смесь нагревать изохорически, то вся вода испаряется при увеличении температуры на  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Чему равно давление насыщенного водяного пара при  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , если в начальном состоянии масса воды составляла 29% от массы всей смеси? Объемом воды по сравнению с объемом смеси пренебречь.

**5.** Насыщенный водяной пар находится в цилиндре под поршнем при температуре  $t = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ . При медленном изотермическом уменьшении объема цилиндра пар начинает конденсироваться. К моменту, когда сконденсировалось  $m = 5 \text{ г}$  пара, объем пара уменьшился на  $\Delta V = 4,5 \text{ л}$ . Какая работа была совершена внешней силой в этом процессе? Сколько пара было в цилиндре вначале, если в конце опыта вода занимала 0,5% объема цилиндра?

Информацию о журнале «Квант» и некоторые материалы из журнала можно найти в ИНТЕРНЕТЕ по адресам:

Курьер образования  
<http://www.courier.com.ru>

Vivos Voco!  
<http://vivovoco.nns.ru>  
(раздел «Из номера»)

Московский детский клуб «Компьютер»  
[math.child.ru](http://math.child.ru)