

Фазовые переходы в задачах по физике

А. ШЕРОНОВ

ИНТЕРЕС к фазовым превращениям вещества понятен. Достаточно вспомнить, что превращение воды в лед или пар и обратно обеспечивает существование всего живого на Земле. Вся химическая и металлургическая промышленность, работа систем жизнеобеспечения человека тесно связаны с плавлением, кристаллизацией, парообразованием и конденсацией различных веществ. Эти превращения встречаются и в задачах по физике, причем нескольких типов.

Для решения одних задач достаточно использовать закон сохранения энергии, а именно уравнение теплового баланса.

В других задачах используются свойства насыщенного пара жидкости. С одной стороны, масса, давление, объем насыщенного пара при заданной (не слишком высокой) температуре связаны уравнением состояния газов, несмотря на значительно большее взаимодействие молекул пара между собой по сравнению с газами. С другой стороны, пока пар остается насыщенным, его давление не зависит от объема, который он занимает. Понятно, что это может происходить за счет конденсации пара или испарения жидкости, которая должна находиться в указанном объеме.

В задачах третьего типа приходится учитывать условия, при которых происходят фазовые превращения. Например, испарение (конденсация) и плавление (отвердевание) происходят обычно при постоянном давлении. Теплота испарения или плавления при этом идет не только на изменение внутренней энергии системы, но и на совершение работы против внешних сил, обеспечивающих постоянство давления. При испарении (конденсации) жидкости за счет подвода (отвода) тепла часть теплоты испарения (конденсации), расходуемая на совершение этой работы, вполне заметна. Напротив, при плавлении (отвердевании) за счет подвода (отвода) тепла работой против внешних сил, как правило, можно пренебречь.

Рассмотрим теперь несколько приме-

ров решения задач, в которых происходят фазовые превращения.

Задача 1. В калориметр, содержащий лед массой $m_1 = 0,4$ кг при температуре $t_1 = -53$ °С, налили воду массой $m_2 = 0,1$ кг с температурой $t_2 = 15$ °С. Найдите температуру в калориметре после установления равновесия. Удельная теплоемкость льда $c_1 = 2,1$ кДж/(кг · К), воды $c_2 = 4,2$ кДж/(кг · К), удельная теплота плавления льда $\lambda = 334$ кДж/кг.

В этой задаче не задано конечное состояние, в котором будет находиться содержимое калориметра в равновесии. Поэтому для решения необходимо провести предварительные оценки баланса тепла. Превращения льда в воду и обратно происходят при $t_0 = 0$ °С (давление в задаче предполагается равным атмосферному). Найдём количество теплоты Q_1 , которое потребуется, чтобы нагреть весь лед до 0 °С от начальной температуры:

$$Q_1 = c_1 m_1 (t_0 - t_1) = 44,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Это тепло может отдать вода при охлаждении от 15 °С до 0 °С и при дальнейшем замерзании. Соответствующие количества теплоты равны

$$Q_2 = c_2 m_2 (t_2 - t_0) = 6,3 \cdot 10^3 \text{ Дж},$$

$$Q_3 = \lambda m_2 = 33,4 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Из сравнения видно, что $Q_1 > Q_2 + Q_3$. Потому конечная температура в калориметре будет отрицательной, вода охладится до 0 °С, замерзнет, а получившийся лед охладится до конечной температуры t_3 . Окончательный баланс тепла имеет вид

$$c_1 m_1 (t_3 - t_1) = c_2 m_2 (t_2 - t_0) + \lambda m_2 + c_1 m_2 (t_0 - t_3),$$

или

$$t_3 \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) = t_1 + \frac{c_2 m_2}{c_1 m_1} t_2 + \frac{\lambda m_2}{c_1 m_1}.$$

Отсюда находим

$$t_3 = -4,6 \text{ °С}.$$

Задача 2. В теплоизолированный сосуд, содержащий газообразный азот

при температуре $T_1 = 300$ К и давлении $p_1 = 1$ атм, впрыснули жидкий азот при $T = 77$ К (температура кипения жидкого азота при атмосферном давлении). После того как жидкий азот испарился, в сосуде установилась температура $T_2 = 150$ К, а давление уменьшилось до $p_2 = 0,72$ атм. Найдите молярную теплоту испарения жидкого азота. Молярная теплоемкость газообразного азота при постоянном объеме составляет $C_V = 20,8$ Дж/(моль · К).

Пусть вначале в сосуде содержалось ν_1 молей азота, а после установления равновесия добавилось еще ν_2 молей. Из уравнения состояния (при постоянном объеме) имеем

$$\frac{(\nu_1 + \nu_2) T_2}{\nu_1 T_1} = \frac{p_2}{p_1}.$$

За счет охлаждения газообразного азота происходит испарение жидкого азота и нагрев получившегося газа до конечной температуры 150 К. Баланс тепла имеет вид

$$\nu_1 C_V (T_1 - T_2) = \nu_2 \lambda + \nu_2 C_V (T_2 - T).$$

С учетом первого равенства для молярной теплоты испарения получим

$$\lambda = \frac{T_2 p_1}{T_1 p_2 - T_2 p_1} C_V (T_1 - T_2) - C_V (T_2 - T) \approx 5500 \text{ Дж/моль}.$$

Задача 3. Замкнутый цилиндрический сосуд делится подвижным поршнем на 2 равные части. В одной из них находится воздух, в другой – вода и пар. При медленном нагревании всего сосуда поршень начинает двигаться и в некоторый момент времени останавливается. В этот момент он делит объем сосуда на части в отношении 1 : 3. Определите отношение массы воды к массе пара в начале опыта. Температуры в обеих частях сосуда все время одинаковы. Объемом, занимаемым водой в одной из частей сосуда, пренебречь.

Пусть объем всего сосуда V_0 , масса пара m_n , воды m_b . Поршень будет двигаться до тех пор, пока вся вода не испарится. При этом объем, занятый паром, увеличится от $V_1 = V_0/2$ до $V_2 = 3V_0/4$, а его масса – от m_n до $m_n + m_b$. Уравнение состояния для воздуха дает

$$\frac{p_1 (V_0 - V_1)}{T_1} = \frac{p_2 (V_0 - V_2)}{T_2},$$

где p_1 , T_1 – начальные давление и температура, а p_2 и T_2 – конечные. Аналогично для пара имеем

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{m_n + m_b}{m_n} \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$