

Задача 25. (МФТИ, 2001) Лёгкий подвижный теплопроводящий поршень делит объём вертикально расположенного цилиндра на две части. Под поршнем в нижней части цилиндра находятся в равновесии вода и пар, температура которых поддерживается постоянной и равной  $T_0$ . В верхней части цилиндра над поршнем находится газообразный гелий.

1) Какое количество теплоты надо подвести квазистатически к пару и воде, чтобы часть воды массой  $\Delta m$  испарилась?

2) Сколько тепла необходимо при этом отвести от гелия?

Удельная теплота испарения воды  $\lambda$ , молярная масса пара  $\mu$ . Трением и теплоёмкостью поршня пренебречь. Считать, что объём пара значительно больше объёма воды, из которой он образовался.

$$0LH \frac{n}{m} \frac{z}{g} = {}^1\partial (z : m \nabla \chi = \partial (1$$

Решение:

Давление насыщенного пара зависит только от температуры, которая по условию в нижней части поддерживается постоянной. Следовательно, давление пара и давление гелия остается в процессе постоянным (гелий отделен от пара подвижной перегородкой). При увеличении температуры гелия в процессе с постоянным давлением подведенное тепло  $Q$  идет на увеличение внутренней энергии и совершения работы гелием против силы давления пара:

$$Q = \nu C_V(T_2 - T_1) + P(V_2 - V_1) = \nu(C_V + R)(T_2 - T_1).$$

Итак, для гелия

$$\Delta T = Q/\nu(C_V + R) = 2Q/5\nu R.$$

При конденсации пара массой  $\Delta m_{\text{п}}$  при постоянном давлении выделяется тепло в количестве  $\lambda \Delta m$ , которое и нужно отвести. Чтобы найти массу  $\Delta m$  сконденсировавшегося пара, надо приравнять величину работы, совершенной гелием

$$A_{\text{г}} = \nu R(T_2 - T_1) = QR/(C_V + R)$$

к величине работы пара  $A_{\text{п}}$  при постоянном давлении и температуре:

$$A_{\text{п}} = P(V_2 - V_1) = (m_2 - m_1)RT_0/\mu_{\text{п}} = \Delta m RT_0/\mu_{\text{п}}.$$

Таким образом,

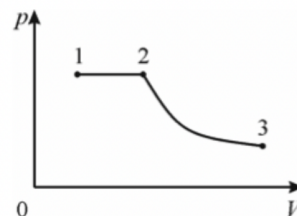
$$QR/(C_V + R) = \Delta m RT_0/\mu_{\text{п}}.$$

$$\Delta m = Q\mu_{\text{п}}/(C_V + R)T_0.$$

Окончательно тепло, которое необходимо отвести от пара:

$$Q_1 = \lambda \Delta m = \lambda \mu_{\text{п}} Q/(C_V + R)T_0 = 2\mu_{\text{п}} \lambda Q/5RT_0.$$

ЗАДАЧА 28. (МОШ, 2014, 11) В гладком цилиндре под подвижным поршнем находятся в равновесии  $\nu$  молей жидкости и  $\nu$  молей её пара (состояние 1 на  $pV$ -диаграмме). Систему «жидкость-пар» сначала медленно нагрели в изобарическом процессе 1–2, при этом её абсолютная температура возросла в два раза. Затем систему медленно охладили в адиабатическом процессе 2–3 до температуры  $T_3$ . Какое количество теплоты получила система «жидкость-пар» в процессе 1–2, если работы, совершённые этой системой в процессах 1–2 и 2–3, были одинаковыми? Молярная теплота парообразования в процессе 1–2 равна  $r$ . В процессе 2–3 конденсация не происходит. Считать пар идеальным газом с молярной теплоёмкостью в изохорном процессе  $C_V = 3R$ . Объём жидкости в состоянии 1 считать пренебрежимо малым по сравнению с объёмом пара.



$$\left( \varepsilon_{LH} \frac{\varepsilon}{\theta} + \varepsilon \right) \alpha = \varepsilon \theta$$

Решение:

В самом начале пар насыщен, значит, в состоянии 2 он насыщенным уже не будет, т.к. температура по условию увеличится в два раза. Пусть она станет равной  $2T$ . Т.е. в процессе 1-2 вся вода испарится. На это потребуется кол-во теплоты  $\nu r$ , газ в процессе испарения воды работу *будет* совершать *но* изменять свою температуру не будет (она по-прежнему будет равна  $T$ ).

Работа будет совершаться при изобарном нагреве газа: т.к. температура увеличится в два раза, то и объём увеличится в два раза, а значит работа равна  $2\nu RT$  (1).

Объём пара будет увеличиваться, поршень будет подниматься, значит, работа никуда не денется. Так что эта работа прибавится к теплоте испарения. Дополнительная работа  $P\Delta V = RT\Delta\nu = \nu RT$ .

В итоге: вся работа равна  $3\nu RT$

Легко найти работу в адиабатическом процессе 2-3: по модулю она равна изменению кинетической энергии газа, т.е.  $6\nu R(2T - T_3)$  (2).

Тогда приравнявая работы (1) и (2) ((по условию они равны):

$$6\nu R(2T - T_3) = 3\nu RT$$

получаем, что:

$$2T_3 = 3T,$$

а значит общее искомое количество теплоты равно  $\frac{16}{3}\nu RT_3 + \nu r$ .

### Критерии

Замечено, что в состоянии 1 пар в сосуде насыщенный – 1 балл

Обосновано, что в состоянии 2 пар уже не является насыщенным – 1 балл

Замечено, что в конечном состоянии в сосуде находится  $2\nu$  молей пара – 1 балл

Работа, совершенная в процессе 1-2, выражена через температуры  $T_1$  и  $T_2$  – 1 балл

Работа, совершенная системой в адиабатическом процессе 2-3, с использованием первого начала термодинамики выражена через температуры  $T_2$  и  $T_3$  – 1 балл

Путем приравнивания работ  $A_{12}$  и  $A_{23}$  найдена связь между температурами  $T_2$  и  $T_3$  – 1 балл

Найдено количество теплоты, необходимое для изобарного нагревания  $2\nu$  молей пара в процессе 1-2 – 2 балла

Найдено полное количество теплоты  $Q_{12}$ , полученное системой в процессе 1-2 – 2 балла

ЗАДАЧА 31. («Покори Воробьёвы горы!», 2017, 10–11) В закрытом с обоих концов цилиндре объёмом  $V = 2$  л свободно ходит невесомый тонкий поршень. В пространстве с одной стороны поршня вводится  $m_1 = 2$  г воды; с другой стороны поршня —  $m_2 = 1$  г азота. Найти отношение объёмов частей цилиндра при  $t = 100^\circ\text{C}$ . Молярная масса воды  $\mu_1 = 18$  г/моль, молярная масса азота  $\mu_2 = 28$  г/моль. Универсальная газовая постоянная  $R = 8,31$  Дж/(моль · К).

$$28'0 \approx \frac{z_A}{T_A}$$

Решение:

Установившееся давление не может быть больше давления насыщенных паров воды ( $p_{\text{нас}} \approx 101$  кПа, при  $t = 100^\circ\text{C}$ ). Если вся вода испарилась, то  $p < p_{\text{нас}}$ , тогда

$$pV_1 = m_1RT/\mu_1;$$

$$p(V-V_1) = m_2RT/\mu_2;$$

$$p = (m_1RT/\mu_1 + m_2RT/\mu_2)/V = RT(m_1/\mu_1 + m_2/\mu_2)/V = 8,31 \cdot 373(2/18 + 1/28)/(2 \cdot 10^{-3}) = 2,28 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$p > p_{\text{нас}}$ , то есть наше предположение неверно; следовательно не вся вода испарилась, и  $p = p_{\text{нас}}$ .

$$p_{\text{нас}}(V-V_1) = m_2RT/\mu_2;$$

$$(V-V_1) = m_2RT/(\mu_2 p_{\text{нас}}) \Rightarrow V_2/V = (V-V_1)/V = m_2RT/(V \mu_2 p_{\text{нас}}) \Rightarrow V_1/V = 1 - m_2RT/(V \mu_2 p_{\text{нас}});$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V \mu_2 p_{\text{нас}}}{m_2 RT} - 1 \approx \frac{9}{11} \approx 0,82.$$

Ответ:  $V_1/V_2 \approx 9/11$ .