

(Ответ: максимальная температура  $T_{\max} = p_0 V_0 / (4R)$  достигается при объеме  $V^{\&} = 5V_0 / 8$ ; на участке  $V < V^{\&}$  газ получает тепло, на участке  $V > V^{\&}$  отдает.)

Эта задача сводится к проанализированной ситуации при  $p_1 = p_0$ ,  $p_2 = 0$ ,  $V_1 = 0$ ,  $V_2 = V_0$ ,  $\nu = 1$  моль. Тогда  $a = -p_0 / V_0$ ,  $b = p_0$ , что для  $V' = V_0 / 2$  дает  $T_{\max} = T(V') = p_0 V_0 / (4R)$ . По формуле (3)  $V^{\&} = 5V_0 / 8$ .

Уточняем ответ: максимальная температура  $T_{\max} = p_0 V_0 / (4R)$  достигается при объеме  $V' = V_0 / 2$ . Вторая часть ответа правильная.

**Задача 5** (2.99 [7]). *Количество теплоты, получаемое тепловой машиной от нагревателя, равно 1 кДж. При этом объем газа увеличивается от 1 л до 2 л, а давление линейно убывает в зависимости от объема от 1000 кПа до 400 кПа. Найдите изменение внутренней энергии газа.*

(Ответ: 300 Дж.)

Очевидно, что ответ к этой задаче принципиально неверен. Действительно, согласно уравнению состояния идеального газа  $pV = \nu RT$ , поскольку  $p_1 V_1 > p_2 V_2$ , то и  $T_1 > T_2$ , т.е. изменение внутренней энергии в этом процессе отрицательно. При заданных параметрах состояний газа количество теплоты, необходимое для проведения процесса, нельзя задавать каким угодно, так как оно должно быть строго определенным.

В частности, если считать газ одноатомным, то, в соответствии с анализом рассмотренной ситуации,  $a = -6 \cdot 10^8$  Па/м<sup>3</sup>,  $b = 1,6 \cdot 10^6$  Па,  $V^{\&} = 5/3$  л. Количество теплоты, необходимое для проведения такого процесса, равно  $Q = Q(V^{\&}) = 533$  Дж. При этом газ совершит работу по расширению  $A' = (p_1 + p_2)(V_2 - V_1)/2 = 700$  Дж. Изменение же внутренней энергии равно  $\Delta U = 3\nu R(T_2 - T_1)/2 = 3(p_2 V_2 - p_1 V_1)/2 = -300$  Дж. Во время процесса расширения от объема  $V^{\&}$  до объема  $V_2$  газ отдаст  $533$  Дж –  $(700 - 300)$  Дж =  $133$  Дж тепла холодильнику.

**Задача 6** (для самостоятельного решения). *Найдите КПД цикла, проведенного с одним молем одноатомного идеального газа. Диаграмма цикла в координатах  $p, V$  представлена на рисунке 5.*

(Ответ: 16/97.)

Итак, никакому состоянию системы нельзя поставить в соответствие ни

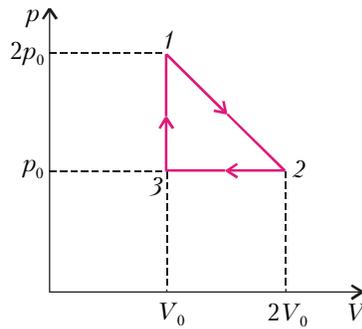


Рис. 5

работу, ни количество теплоты. Они являются функциями процесса, а не состояния. В этом их принципиальное отличие от внутренней энергии. Работа и количество теплоты – это не формы энергии, а только количественные меры способов ее изменения и передачи от одного тела к другому (работа – макроскопический способ, теплопередача – микроскопический). В отличие от внутренней энергии – однозначной функции параметров состояния, количество теплоты не может быть представлено в виде разности значений какой-либо функции параметров состояния, если неизвестно уравнение процесса. Передаваемое системе количество теплоты, как и работа, зависят от того, каким способом система переходит из начального состояния в конечное.

Почему же все-таки передача телу тепла часто ассоциируется с его нагреванием? Первая причина – бытовая: каждый день мы передаем различным телам с помощью различных приборов определенные количества теплоты и замечаем при этом повышение их температуры. Вторая причина – более глубокая, физическая: недостаточные знания о теплоемкости, которая характеризует систему, получающую или отдающую энергию в виде тепла.

Теплоемкость  $C$  системы (тела) – это отношение переданного системе на участке процесса количества теплоты  $\Delta Q$  к происшедшему на этом участке изменению температуры системы  $\Delta T$ :

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}.$$

А поскольку количество теплоты, передаваемое системе при изменении ее температуры на  $\Delta T$ , будет неодинаковым для различных процессов, проводимых с этой системой, то разной будет и теплоемкость. Таким образом, теплоемкость является характеристикой не самой системы или вещества, а конкретного процесса, проводимого с этой системой или веществом. В соответствии с первым законом термодинамики,

$$C = \frac{\Delta U}{\Delta T} + \frac{\Delta A'}{\Delta T},$$

где  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии системы и  $\Delta A'$  – работа системы при изменении температуры на  $\Delta T$ .

Для твердых и жидких веществ при изменении температуры объем изменяется очень мало, поэтому  $\Delta A' = 0$ , и  $C = \Delta U / \Delta T$ . Так как  $U$  – функция параметров состояния и  $\Delta U$  не зависит от того, каким образом система переведена из одного состояния в другое, то для жидкостей и твердых тел в некоторых интервалах температур  $C$  является практически постоянной величиной. Для удобства вводят удельную теплоемкость вещества:  $c = C/m$ . Вот эта величина в формуле  $Q = cm\Delta T$  (которую многие считают определением количества теплоты) и дает основание ошибочно думать, что для всех веществ температура возрастает при сообщении им некоторого количества теплоты, ибо из этой формулы следует прямая пропорциональность между  $\Delta T$  и  $Q$ .

Однако для газов ситуация другая. В общем случае газы могут сильно изменять свой объем. Введем молярную теплоемкость газа  $C_m = \Delta Q / (\nu \Delta T)$ . Так как  $\Delta A' = p\Delta V$  (при малом  $\Delta V$ ), то

$$C_m = \frac{1}{\nu} \left( \frac{\Delta U}{\Delta T} + p \frac{\Delta V}{\Delta T} \right).$$

Чтобы теплоемкость была определена однозначно, надо указать уравнение процесса.

Известны процессы, называемые политропическими, в которых теплоемкость газа является величиной постоянной на всем протяжении процесса. Далее для простоты будем рассматривать идеальный одноатомный газ. С ним возможны такие политропические процессы:

*изохорный процесс* – так как  $\Delta V = 0$ , то  $C_m = C_v = \Delta U / (\nu \Delta T) = 3R/2$ ;

*изобарный процесс* – так как  $\Delta A' = p\Delta V = \nu R\Delta T$ , то  $C_m = C_p = 3R/2 + R = 5R/2$  (очевидно, что  $C_p = C_v + R$  для любого идеального газа, а не только одноатомного);

*изотермический процесс* – так как  $\Delta T = 0$ , то  $C_m = \pm\infty$  (плюс относится к изотермическому расширению, минус – к изотермическому сжатию);

*адиабатный процесс* – так как  $\Delta Q = 0$ , то  $C_m = 0$ .

А сейчас покажем, что теплоемкость может принимать и промежуточные между указанными выше значения. Для этого найдем зависимость молярной теплоемкости от объема в рассмотренной в начале статьи ситуации, счи-