

## Лекция 16

*Тема: Равновесные состояния и процессы, их изображение на термодинамических диаграммах.*

Среди равновесных процессов, происходящих с термодинамическими системами, выделяются **изопрцессы**, при которых один из основных параметров состояния сохраняется постоянным.

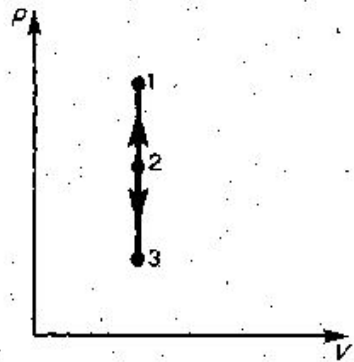


Рисунок 1

Процесс ( $V = \text{const}$ ). Диаграмма этого процесса (**изохора**) в  $p$ - $V$  изображается прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 1), где 1—2 есть изохорное нагревание, а 2—3 — изохорное охлаждение. В этом процессе газ не совершает работы над внешними телами, т. е.

$$\delta A = p dV = 0.$$

Как уже указывалось в предыдущем лекции, из первого начала термодинамики ( $\delta Q = dU + \delta A$ ) для изохорного процесса следует, что вся теплота, сообщаемая газу, идет на увеличение его внутренней энергии:

$$\delta Q = dU.$$

Согласно формуле ( $c_v = \frac{dU_m}{dT}$ ),

$$dU_m = C_v dT.$$

Тогда для произвольной массы газа получим

$$\delta Q = dU = \frac{m}{M} C_v dT. \quad (1)$$

**Изобарный процесс** ( $p = \text{const}$ ). Диаграмма этого процесса (изобара) в координатах  $p, V$  изображается прямой, параллельной оси  $V$ . При изобарном процессе работа газа ( $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$ ) при увеличении объема от  $V_1$  до  $V_2$  равна

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) \quad (2)$$

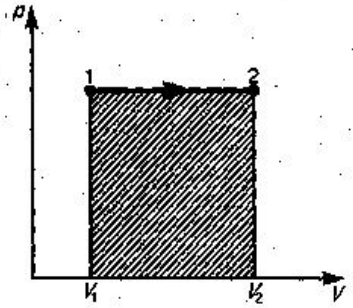


Рисунок 2

и определяется площадью заштрихованного прямоугольника (рис. 2). Если использовать уравнение ( $pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT$ ) Клапейрона — Менделеева для выбранных нами двух состояний, то

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1, \quad pV_2 = \frac{m}{M} RT_2,$$

откуда

$$V_2 - V_1 = \frac{m}{M} \frac{R}{p} (T_2 - T_1).$$

Тогда выражение (2) для работы изобарного расширения примет вид

$$A = \frac{m}{M} R (T_2 - T_1). \quad (3)$$

Из этого выражения вытекает физический смысл молярной газовой постоянной  $R$ : если  $T_2 - T_1 = 1$  К, то для 1 моль газа  $R = A$ , т. е.  $R$  численно равна работе изобарного расширения 1 моль идеального газа при нагревании его на 1 К.

В изобарном процессе при сообщении газу массой  $m$  количества теплоты

$$\delta Q = \frac{m}{M} C_p dT$$

его внутренняя энергия возрастает на величину (согласно формуле ( $c_v = \frac{dU_m}{dT}$ .)

$$dU = \frac{m}{M} C_v dT.$$

При этом газ совершит работу, определяемую выражением (3).

**Изотермический процесс** ( $T = \text{const}$ ). Как уже указывалось, изотермический процесс описывается законом Бойля—Мариотта:  $pV = \text{const}$ .

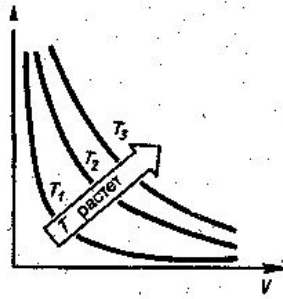


Рисунок 3

Диаграмма этого процесса (**изотерма**) в координатах  $p$ ,  $V$  представляет собой гиперболу (см. рис. 60), расположенную на диаграмме тем выше, чем выше температура, при которой происходит процесс.

Исходя из выражений ( $A = \int_{v_1}^{v_2} p dV$ .) и ( $pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT$ .) найдем работу изотермического расширения газа:

$$A = \int_{v_1}^{v_2} p dV = \int_{v_1}^{v_2} \frac{m}{M} RT \frac{dV}{V} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Так как при  $T = \text{const}$  внутренняя энергия идеального газа не изменяется:

$$dU = \frac{m}{M} C_v dT = 0,$$

то из первого начала термодинамики ( $\delta Q = dU + \delta A$ ) следует, что для изотермического процесса

$$\delta Q = \delta A,$$

т. е. все количество теплоты, сообщаемое газу, расходуется на совершение им работы против внешних сил:

$$Q = A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (4)$$

Следовательно, для того чтобы при расширении газа температура не понижалась, к газу в течение изотермического процесса необходимо подводить количество теплоты, эквивалентное внешней работе расширения.





равновесному). В дальнейшем рассматриваемые процессы будем считать равновесными

Среди равновесных процессов, происходящих с термодинамическими системами, выделяются изопроцессы, при которых один из основных параметров состояния сохраняется постоянным

Изохорный процесс ( $V = const$ ). Диаграмма этого процесса (изохора) в координатах  $p, V$  изображается прямой, параллельной оси ординат (рис. 1), где процесс 1—2 есть изохорное нагревание, а 1-3 - изохорное охлаждение. При изохорном процессе газ не совершает работы над внешними телами, т. е. как уже указывалось, из первого начала термодинамики ( $\delta Q = dU + \delta A$ ) для изохорного процесса следует, что вся теплота, сообщаемая газу, идет на увеличение его внутренней энергии:

$$\delta Q = dU.$$

$$\delta A = p dV = 0.$$

Согласно формуле  $C_V = \frac{dU_m}{dT}$ , отсюда вытекает, что

$$dU_m = C_V dT$$

Тогда для произвольной массы газа получим

$$\delta Q = dU = \frac{m}{\mu} C_V dT. \quad (1)$$



Изобарный процесс ( $p = \text{const}$ ). Диаграмма этого процесса (изобара) в координатах  $p, V$  изображается прямой, параллельной оси  $V$ .

Если использовать уравнение Клапейрона - Менделеева для выбранных нами двух состояний, то

$$pV_1 = \frac{m}{\mu}RT_1 \quad pV_2 = \frac{m}{\mu}RT_2 \Rightarrow V_2 - V_1 = \frac{m}{\mu} \frac{R}{p} (T_2 - T_1).$$

Тогда выражение (7) для работы изобарного расширения примет вид

$$A = \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1). \quad (2)$$

Из этого выражения вытекает физический смысл молярной газовой постоянной  $R$ : если  $T_2 - T_1 = 1K$ , то для 1 моль газа  $R = A$ , т. е.  $R$  численно равна работе изобарного расширения

1 моль идеального газа при нагревании его на 1 К.

В изобарном процессе при сообщении газу массой  $m$  количества теплоты

$$\delta Q = \frac{m}{\mu} C_p dT$$

его внутренняя энергия возрастает на величину (согласно формуле (3)).

$$dU = \frac{m}{\mu} C_v dT$$

**Изотермический процесс** ( $T = \text{const}$ ). Как уже указывалось раньше, изотермический процесс описывается законом Бойля—Мариотта:

$$pV = \text{const}.$$

Так как при  $T = \text{const}$  внутренняя энергия идеального газа не изменяется:

$$dU = \frac{m}{\mu} C_V dT = 0.$$

то из первого начала термодинамики ( $\delta Q = dU + \delta A$ ) следует, что для изотермического процесса

$$\delta Q = \delta A.$$

т. е. все количество теплоты, сообщаемое газу, расходуется на совершение им работы против внешних сил:

$$Q = A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Следовательно, для того чтобы при расширении газа температура не понижалась, к газу в течение изотермического процесса необходимо подводить количество теплоты, эквивалентное внешней работе расширения.

Адиабатическим называется процесс, при котором отсутствует теплообмен ( $\delta Q=0$ ) между системой и окружающей средой. К адиабатическим процессам можно отнести все быстропротекающие процессы. Например, адиабатическим процессом можно считать процесс распространения звука в среде, так как скорость распространения звуковой волны настолько велика, что обмен энергией между волной и средой произойти не успевает. Адиабатические процессы применяются в двигателях внутреннего сгорания (расширение и сжатие горючей смеси в цилиндрах), в холодильных установках и т. д.

*Из первого начала термодинамики ( $\delta Q=dU+\delta A$ ) для адиабатического процесса следует, что*