

Лекция 18

Тема: Изопроцессы. Адиабатический процесс. Круговой процесс. Обратимые и необратимые процессы.

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 успевают. 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

$$\delta A = -dU, \quad (1)$$

т. е. внешняя работа совершается за счет изменения внутренней энергии системы.

Используя выражения $\delta A = p dV$ и $C_V = \frac{dU_m}{dT}$, для произвольной массы газа перепишем уравнение (1) в виде

$$p dV = -\frac{m}{M} C_V dT. \quad (2)$$

Продифференцировав уравнение состояния для идеального $pV = \frac{m}{M} RT$, получим

$$p dV + V dp = \frac{m}{M} R dT. \quad (3)$$

Исключим из (2) и (3) температуру T .

$$\frac{pdV + Vdp}{pdV} = -\frac{R}{C_V} = -\frac{C_p - C_V}{C_V}.$$

Разделив переменные и учитывая, что $C_p/C_V = \gamma$ ($\gamma = C_p/C_V = (i + 2)/i$), найдем

$$dp/p = -\gamma dV/V.$$

Интегрируя это уравнение в пределах от p_1 до p_2 и соответственно от V_1 до V_2 , а затем потенцируя, придем к выражению

$$p_2/p_1 = (V_1/V_2)^\gamma, \text{ или } p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma.$$

Так как состояния 1 и 2 выбраны произвольно, то можно записать

$$(4) \quad pV^\gamma = \text{const.}$$

Полученное выражение есть **уравнение адиабатического процесса**, называемое также **уравнением Пуассона**.

Для перехода к переменным T , V или p , T исключим из (4) с помощью уравнения Клапейрона — Менделеева

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

соответственно давление или объем:

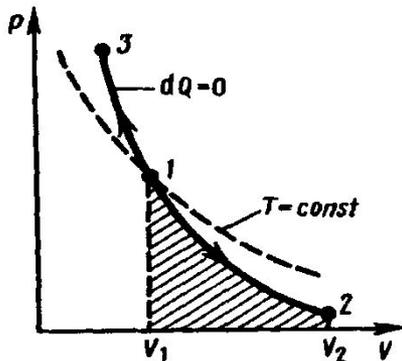
$$TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad (5)$$

$$T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const}. \quad (6)$$

Выражения (4) — (6) представляют собой уравнения адиабатического процесса. В этих уравнениях безразмерная величина ($\gamma = C_p/C_V = (i + 2)/i$) и ($C_m = cM$) $\gamma = C_p/C_V = c_p/c_v = (i+2)/i$

называется **показателем адиабаты** (или **коэффициентом Пуассона**). Для одноатомных газов (Ne, He и др.), достаточно хорошо удовлетворяющих условию идеальности, $i=3$, $\gamma=1,67$. Для двухатомных газов (H₂, N₂, O₂ и др.) $i=5$, $\gamma=1,4$. Значения γ , вычисленные по формуле (55.7), хорошо подтверждаются экспериментом.

Диаграмма адиабатического процесса (*адиабата*) в координатах p, V изображается гиперболой (рис. 1). На рисунке видно, что адиабата ($pV^\gamma = \text{const}$)



более крута, чем изотерма ($pV = \text{const}$). Это объясняется тем, что при адиабатическом сжатии 1—3 увеличение давления газа обусловлено не только уменьшением его объема, как при изотермическом сжатии, но и повышением температуры.

Вычислим работу, совершаемую газом в адиабатическом процессе. Запишем уравнение (1) в виде

Рисунок 1

$$\delta A = - \frac{m}{M} C_V dT.$$

Если газ адиабатически расширяется от объема V_1 до V_2 , то его температура уменьшается от T_1 до T_2 и работа расширения идеального газа

$$A = - \frac{m}{M} C_V \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (8) \quad \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2).$$

Применяя те же приемы, что и при выводе формулы (5), выражение (8) для работы при адиабатическом расширении можно преобразовать к виду

$$A = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{M} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right],$$

где $p_1 V_1 = \frac{m}{M} RT_1$.

Работа, совершаемая газом при адиабатическом расширении 1—2 (определяется площадью, заштрихованной на рис. 1), меньше, чем при изотермическом. Это объясняется тем, что при адиабатическом расширении происходит охлаждение газа, тогда как при изотермическом — температура поддерживается постоянной за счет притока извне эквивалентного количества теплоты.

Рассмотренные изохорный, изобарный, изотермический и адиабатический процессы имеют общую особенность — они происходят при постоянной теплоемкости. В первых двух процессах теплоемкости соответственно равны C_V и C_p , в изотермическом процессе ($dT=0$) теплоемкость равна $\pm\infty$, в адиабатическом ($\delta Q=0$) теплоемкость равна нулю. Процесс, в котором теплоемкость остается постоянной, называется **политропным**.

Исходя из первого начала термодинамики при условии постоянства теплоемкости ($C = \text{const}$) можно вывести уравнение политропы:

$$(p)V^n = \text{const},$$

где $n = (C - C_p) / (C - C_v)$ — показатель политропы. Очевидно, что при $C = 0$, $n = \gamma$, из (55.9) получается уравнение адиабаты; при $C = \infty$, $n = 1$ — уравнение изотермы; при $C = C_p$, $n = 0$ — уравнение изобары, при $C = C_v$, $n = \pm\infty$ — уравнение изохоры. Таким образом, все рассмотренные процессы являются частными случаями политропного процесса.

Круговым процессом (или циклом) называется процесс, при котором система, пройдя через ряд состояний, возвращается в исходное. На диаграмме процессов цикл изображается замкнутой кривой (рис. 1). Цикл, совершаемый идеальным газом, можно разбить на процессы расширения (1—2) и сжатия (2—1) газа. Работа расширения (определяется площадью фигуры $1a2V_2V_11$ положительна ($dV > 0$), работа сжатия (определяется площадью фигуры $2bV_1V_22$) отрицательна ($dV < 0$). Следовательно, работа, совершаемая газом за цикл, определяется площадью, охватываемой замкнутой кривой. Если за цикл совершается положительная работа $A = \oint p dV > 0$ (цикл протекает по часовой стрелке), то он называется прямым (рис. 1, а), если за цикл совершается отрицательная работа $A = \oint p dV < 0$ (цикл протекает против часовой стрелки), то он называется обратным (рис. 1, б).

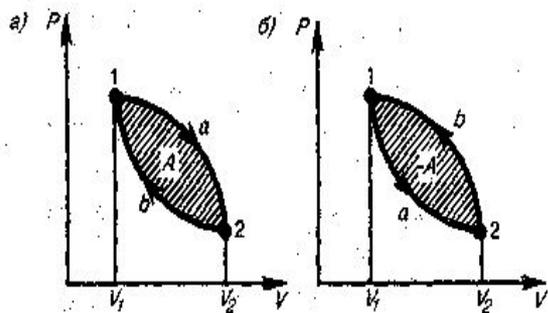


Рисунок 1

Прямой цикл используется в *тепловых двигателях* — периодически действующих двигателях, совершающих работу за счет полученной извне теплоты. Обратный цикл используется в *холодильных машинах* — периодически действующих установках, в которых за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой.

В результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние и, следовательно, полное изменение внутренней энергии газа равно нулю. Поэтому первое начало термодинамики ($Q = \Delta U + A$) для кругового процесса

$$Q = \Delta U + A = A, \quad (10)$$

т. е. работа, совершаемая за цикл, равна количеству полученной извне теплоты. Однако в результате кругового процесса система может теплоту как получать, так и отдавать, поэтому $Q = Q_1 - Q_2$,

где Q_1 — количество теплоты, полученное системой, Q_2 — количество теплоты, отданное системой. Поэтому **термический коэффициент полезного действия для кругового процесса**

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (11)$$

где Q_1 - количество теплоты, полученное системой, Q_2 — количество теплоты, отданное системой. Поэтому термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

Термодинамический процесс называется обратимым, если он может происходить как в прямом, так и в обратном направлении, причем если такой процесс происходит сначала в прямом, а затем в обратном направлении и система возвращается в исходное состояние, то в окружающей среде и в этой системе не происходит никаких изменений. Всякий процесс, не удовлетворяющий этим условиям, является необратимым.

Любой равновесный процесс является обратимым. Обратимость равновесного процесса, происходящего в системе, следует из того, что ее любое промежуточное состояние есть состояние термодинамического равновесия; для него «безразлично», идет процесс в прямом или обратном направлении. Реальные процессы сопровождаются диссипацией энергии (из-за трения, теплопроводности и т. д.), которая нами не обсуждается.

Обратимые процессы — это идеализация реальных процессов. Их рассмотрение важно по двум причинам: 1) многие процессы в природе и технике практически обратимы; 2) обратимые процессы являются наиболее экономичными; имеют максимальный термический коэффициент полезного действия, что позволяет указать пути повышения к. п. д. реальных тепловых двигателей.