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 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 ($\delta Q=\mathrm{d}U+\delta A$) для адиабатического процесса следует, что

$$\delta A = -\mathrm{d}U, \qquad (1)$$

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

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

$$p\mathrm{d}V = -\frac{m}{M}C_V\mathrm{d}T. \qquad (2)$$

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

$$p\mathrm{d}V + V\mathrm{d}p = \frac{m}{M}R\mathrm{d}T. \qquad (3)$$

Исключим из (2) и (3) температуру T.

$$\frac{p\,dV + V\,dp}{p\,dV} = -\frac{R}{C_V} = -\frac{C_p - C_V}{C_V}.$$

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:

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

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

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, γ=1,67. Для двухатомных газов (H2, N2, O2 и др.) i=5, γ=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^γ = const более крута, чем изотерма (pV = 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.

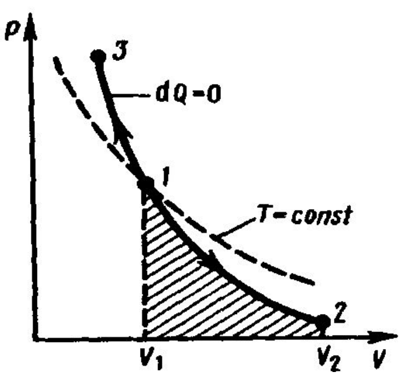

Рисунок 1

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

$$\delta A = -\frac{m}{M} C_V \mathrm{d}T.$$

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

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

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=const) можно вывести уравнение политропы:

$$pV^n = \text{const}, \quad (9)$$

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)*.

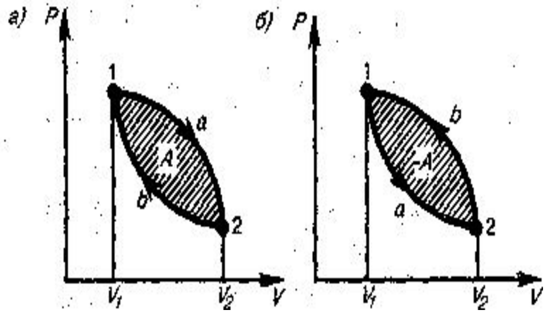

Рисунок 1

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

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

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**

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

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.***