

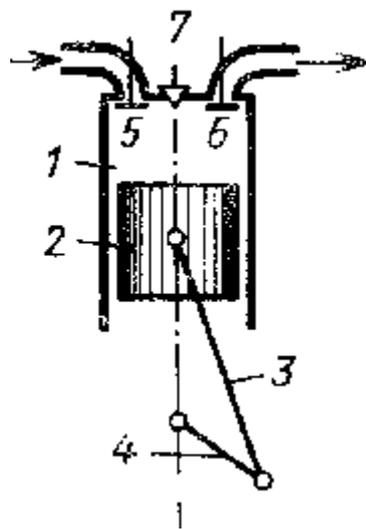
Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания

Двигателями внутреннего сгорания (д.в.с.) называются тепловые двигатели, рабочим телом которых служат газообразные продукты сгорания топлива, сжигаемого непосредственно внутри самого двигателя.

По характеру рабочего цикла:

- двигатели быстрого сгорания с искровым зажиганием топливно-воздушной смеси;
- двигатели постепенного сгорания, характеризующиеся самовоспламенением топлива.

Для выявления основных особенностей двигателей быстрого сгорания рассмотрим устройство и работу бензинового двигателя.

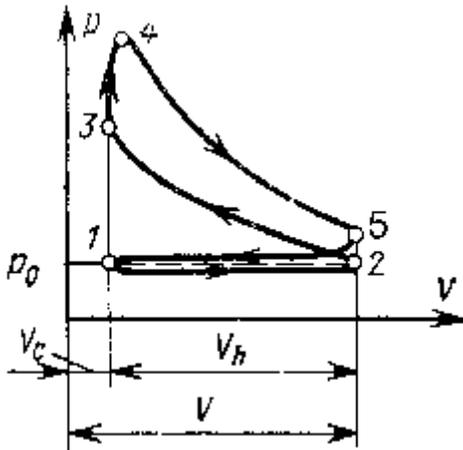


Этот двигатель состоит из нескольких цилиндров

1. В каждом цилиндре находится поршень 2, совершающий возвратно-поступательное движение, которое шатуном 3 передается на коленчатый вал 4 приводит его во вращение. В крышке цилиндра имеется всасывающий клапан 5, через который в цилиндр поступает смесь паров топлива с воздухом, выхлопной клапан 6, через который из цилиндра удаляются отработавшие газы и запальное устройство (свеча) 7.

Характер реальных процессов в двигателе отражает индикаторная диаграмма, в которой точка 1 соответствует крайнему положению поршня.

На горизонтальной оси индикаторной диаграммы откладывается объем цилиндра в данный момент, причем отрезок V_c представляет собой объем камеры сжатия, отрезок V_h – полезный объем цилиндра, а отрезок V – его полный объем.

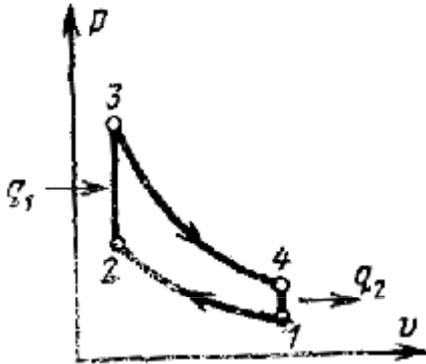


Идеализируя рабочий цикл двигателей быстрого сгорания получаем термодинамический цикл, называемый циклом Отто.

В этом цикле

адиабата 1-2 соответствует процессу сжатия рабочей смеси,
изохора 2-3 – процессу горения топлива,

адиабата 3-4 – расширению продуктов сгорания,
изохора 4-1 соответствует двум процессам – выхлопу отработавших газов и всасыванию новой порции рабочей смеси.



Таким образом, идеализация работы двигателя сводится в основном к тому, что химическая реакция горения, сопровождающаяся выделением тепла, заменяется обратимым подводом тепла извне, а смена рабочего тела заменяется процессом, происходящим с одним и тем же рабочим телом, но сопровождающиеся отводом тепла.

Термический к.п.д. цикла Отто составляет

$$h_T = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_J(T_4 - T_1)}{c_J(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} .$$

Разделив и умножив числитель дроби на T_1 , а знаменатель на T_2 , получим

$$h_T = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \cdot \frac{T_1}{T_2}$$

Сравнив адиабаты 1-2 и 3-4, $\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{J_3}{J_4}\right)^{k-1}$, $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{J_2}{J_1}\right)^{k-1}$ МОЖНО
доказать, что

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

и, следовательно, $h_T = 1 - \frac{T_1}{T_2}$

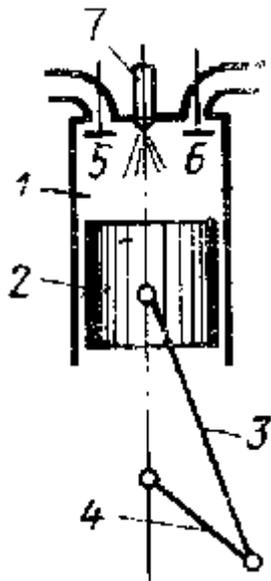
Основной характеристикой цикла Отто является *степень сжатия* $e = J_1 / J_2$, т. е. отношение всего объема цилиндра к объему камеры сжатия:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{J_2}{J_1} \right)^{k-1} = \frac{1}{e^{k-1}},$$

откуда получаем $h_T = 1 - \frac{1}{e^{k-1}}$

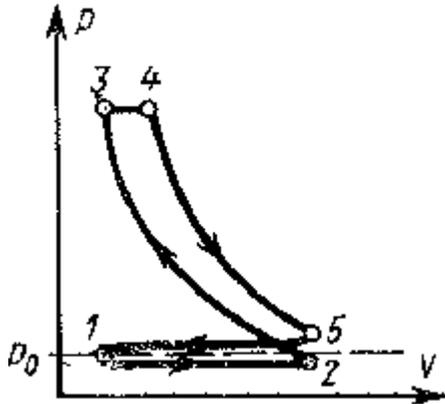
Предел повышению степени сжатия в двигателе быстрого сгорания ставится тем условием, что в конце сжатия температура в цилиндре не должна достигать температуры самовоспламенения топлива. Это обстоятельство ограничивает степень сжатия величиной от 4 до 10, в зависимости от характеристик сжигаемого топлива. Поэтому такие двигатели называют двигателями низкого сжатия.

Рассмотрим устройство и работу дизеля.



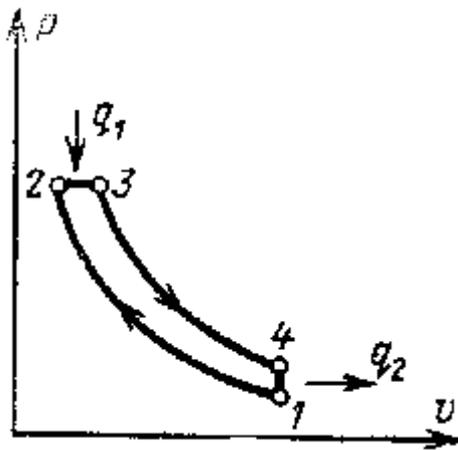
Главные части этого двигателя – цилиндр 1, поршень 2, шатун 3 и коленчатый вал 4. В крышке имеются всасывающий клапан 5, выхлопной клапан 6 и форсунка 7.

На индикаторной диаграмме двигателя точка 1 соответствует крайнему верхнему положению поршня.



Степень сжатия в этих двигателях бывает высокой ($\epsilon = 12 \div 20$), поэтому при сжатии воздух сильно повышается давление, а вместе с ним и температура, которая в конце сжатия получается на $200 - 300^\circ\text{C}$ выше температуры

самовоспламенения топлива.



Идеализируя рабочий цикл двигателей постепенного сгорания получаем термодинамический цикл, называемый *циклом Дизеля*.

В этом цикле

адиабата 1-2 соответствует сжатию воздуха в цилиндре,

изобара 2-3 – горению топлива,

адиабата 3-4 – расширению продуктов сгорания,

изохора 4-1 соответствует выхлопу отработавших газов и всасыванию новой порции воздуха.

Общее выражение для термического к.п.д. в данном случае принимает вид

$$h_T = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_J(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)},$$

или после

$$h_T = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{k \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} \frac{T_1}{T_2}$$

Основными характеристиками цикла Дизеля являются степень сжатия $e = J_1 / J_2$ и степень предварительного расширения $r = J_3 / J_2$.

Чтобы выразить η_T как функцию этих характеристик, установим следующие соотношения.

для изобары 2-3 $\frac{T_3}{T_2} = \frac{J_3}{J_2} = r$

для адиабаты 1-2 $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{J_2}{J_1}\right)^{k-1} = \frac{1}{e^{k-1}}$

для изохоры 4-1, поскольку для адиабат

$p_4 J_4^k = p_3 J_3^k$, $p_1 J_1^k = p_2 J_2^k$, $J_4 = J_1$, имеем:

$$\frac{RT_4}{RT_1} = \frac{p_4 J_4^k}{p_1 J_1^k} = \frac{p_3 J_3^k}{p_2 J_2^k} = r^k$$

Окончательно получим

$$h_T = 1 - \frac{r^k - 1}{k(r - 1)} \cdot \frac{1}{e^{k-1}}$$

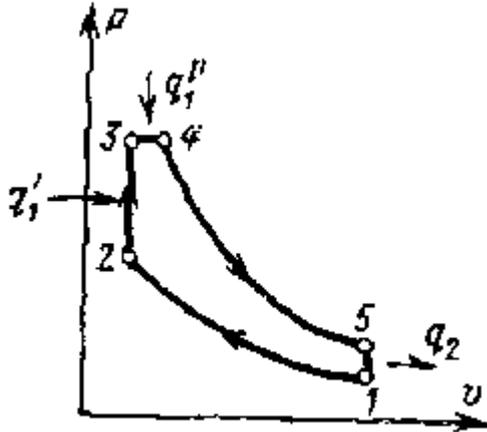
Основным фактором, определяющим экономичность двигателей, работающих по циклу Дизеля, также является степень сжатия ε , с увеличением которой термически к.п.д. цикла возрастает.

Вторым фактором, влияющим на экономичность рассматриваемых двигателей, является степень предварительного расширения ρ . Величина ее зависит от количества топлива, вводимого в цилиндр за один рабочий цикл, т.е. от нагрузки двигателя, с увеличением которой увеличивается и ρ . С увеличением нагрузки двигателя термический к.п.д. цикла уменьшается.

Анализ показывает, что было бы целесообразным построить цикл таким образом, чтобы подвод тепла происходил сначала при $J = \text{const}$, а затем, когда давление дойдет до поставленного предела, подвод тепла продолжался бы при $p = \text{const}$.

Такой цикл носит название *цикла Тринклера*.

В этом цикле



адиабата 1-2 – сжатие в цилиндре чистого воздуха с повышением его температуры выше температуры самовоспламенения топлива;

изохора 2-3 – практически мгновенное сгорание первой части горючей смеси;

изобара 3-4 – горение остальной части порции топлива постепенно по мере

поступления из форсунки;

адиабата 4-5 – расширение продуктов сгорания;

изохора 5-1 – смена рабочего тела.

Термический к.п.д. цикла Тринклера можно определить в общем виде из формулы

$$h_T = 1 - \frac{q_2}{q_1' + q_1''} = 1 - \frac{c_J(T_5 - T_1)}{c_J(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_3 - T_2 + k(T_4 - T_3)}$$

К основным характеристикам цикла Тринклера относится, помимо степени сжатия ε и степени предварительного расширения ρ , еще и степень повышения давления $l = p_3 / p_2$.

$$h_T = \frac{\frac{T_5}{T_1} - 1}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right) + k \left(\frac{T_4}{T_2} - \frac{T_3}{T_2}\right)} \frac{T_1}{T_2}$$

Далее, с целью замены отношений температур на выражения, содержащие только ε , λ и ρ , установим следующие соотношения.

Для адиабаты 1-2
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{J_2}{J_1} \right)^{k-1} = \frac{1}{e^{k-1}}$$

Для изохоры 2-3 и изобары 3-4
$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = l, \quad \frac{T_4}{T_3} = \frac{J_4}{J_3} = r$$

откуда получаем
$$\frac{T_3}{T_2} = l r$$

Для изохоры 5-1, учитывая, что для адиабат $p_5 J_5^k = p_4 J_4^k$,
 $p_1 J_1^k = p_2 J_2^k$, $J_5 = J_1$, $J_2 = J_3$, $p_4 = p_3$, имеем

$$\frac{RT_5}{RT_1} = \frac{p_5 J_5^k}{p_1 J_1^k} = \frac{p_4 J_4^k}{p_2 J_2^k} = \frac{p_3}{p_2} \left(\frac{J_4}{J_3} \right)^k = 1 r^k$$

Выражение для термического к.п.д. цикла Тринклера принимает вид

$$h_T = 1 - \frac{1r^k - 1}{(1 - 1) + k1(r - 1)} \cdot \frac{1}{e^{k-1}}$$

Легко заметить, что выражения для термических к.п.д. циклов Дизеля и Отто являются частными случаями этого более общего выражения. Действительно, если $\lambda = 1$, то получится формула для термического к.п.д. цикла Дизеля, а при $r = 1$ получится формула для термического к.п.д. цикла Отто.