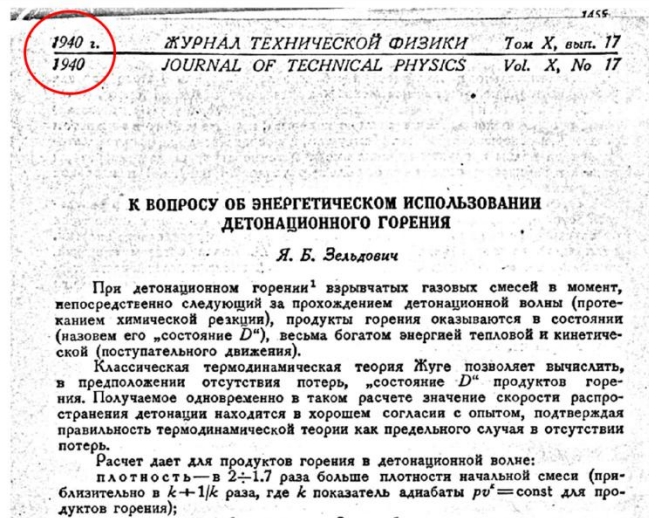


Термодинамическое обоснование эффективности детонационного цикла



Я. Б. Зельдович

$$\eta_{\text{Detonation}} > \eta_{V=\text{const}} > \eta_{P=\text{const}}$$

Рассмотрим в соответствии со статьей Я.Б. Зельдовича [1] сжигание метано-воздушной смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7,52\text{N}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,52\text{N}_2$. Предположим, что исходное термодинамическое состояние смеси на диаграмме «давление p – удельный объем v » (рис. 1) соответствует точке O , т.е. $p = p_0, v = v_0$. Синяя сплошная линия на рисунке представляет собой адиабату Гюгонио для указанной смеси при заданных начальных условиях. Классической детонации соответствует скачкообразный переход из точки O вдоль прямой Михельсона–Рэля OD на ударную адиабату (не показана) с последующим возвратом вдоль прямой Михельсона–Рэля в точку D . Сжигание топлива при постоянном объеме приводит к изменению термодинамического состояния смеси вдоль линии OF . Сжиганию топлива при постоянном давлении соответствует переход из точки O в точку G на адиабате Гюгонио. Предположим теперь, что после сжигания продукты детонации изэнтропически расширяются до начального давления p_0 .

Вследствие того, что энтропия в точке D меньше, чем в точках F и G (см. вставку на рис. 1), изменение энтропии минимально при сгорании смеси в детонационной волне и последующем изэнтропическом расширении до начального давления, т.е.

$$S_D - S_O < S_F - S_O < S_G - S_O < S_C - S_O$$

Следовательно, при детонационном сжигании топлива достигается максимальная термодинамическая эффективность превращения химической энергии топлива в полезную работу.

Термодинамические циклы, в которых топливо сжигают при постоянном давлении и постоянном объеме с последующим изэнтропическим расширением продуктов горения до начального давления традиционно называют циклами Брайтона и Хампри. Цикл, в котором топливо сжигают в детонационной волне, называют детонационным циклом или циклом Зельдовича. Коэффициент полезного действия (КПД) термодинамических циклов можно оценить следующим образом. В исходном состоянии (точка O) энтальпия реагирующей смеси определяется выражением $H_0 = h_0 + Q$, где h_0 - начальная энтальпия, Q - теплота сгорания. Энтальпия продуктов сгорания $H = h$. Работа, совершаемая за время цикла, определяется как

Стационарные режимы горения

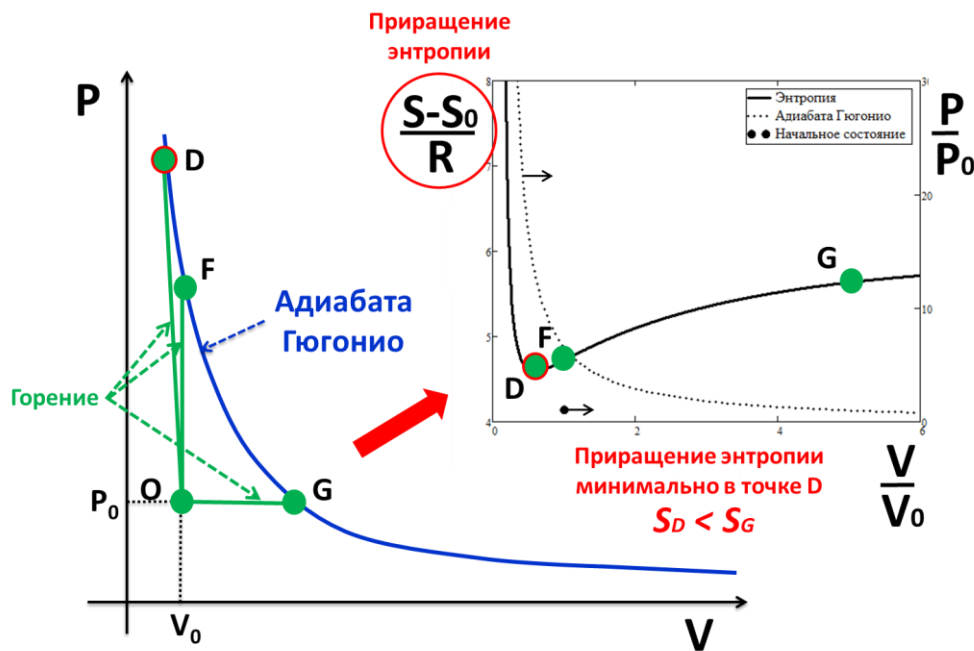


Рис. 1: Сжигание топлива при постоянном давлении (цикл Брайтона, точка G), постоянном объеме (цикл Хампри, точка F) и в волне детонации (цикл Зельдовича, точка D).

$A = A_e - A_a = H_0 - H = h_0 - h + Q$, где A_e - работа при расширении, $A_a = p_0(v - v_0)$ - работа против сил внешнего давления. Определим КПД как

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{H_0 - H}{Q}$$

Для количественных оценок предположим, что метано-воздушная смесь подчиняется уравнению состояния идеального газа при постоянных удельных теплоемкостях. Теплота сгорания метана в расчете на моль топлива равна 213000 кал/моль, так что теплота реакции в расчете на моль смеси приблизительно равна $Q = 21000$ кал/моль. При начальной температуре $T_0 = 300$ К и давлении $p_0 = 1$ атм для удельных теплоемкостей при постоянном давлении (c_{p0}) и постоянном объеме (c_{v0}) примем: $c_{p0} = 7$ кал/моль и $c_{v0} = 9.12$ кал/моль, так что показатель адиабаты $\gamma_0 = c_{p0}/c_{v0} = 1.394$. Для удельных теплоемкостей продуктов сгорания и соответствующего показателя адиабаты примем: $c_p = 11.1$ кал/моль, $c_v = 9.12$ кал/моль, $\gamma = c_p/c_v = 1.217$. Адиабата Гюгонио описывается уравнением:

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \frac{v}{v_0} + \frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{Q}{c_p T_0}}{\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \frac{v}{v_0} - 1} \approx \frac{81 - \frac{v}{v_0}}{10.09 \frac{v}{v_0} - 1}$$

В результате сжигания смеси при $p = const$ температура, давление, удельный объем и энтальпия продуктов в точке G (рис. 1) определяются следующим образом:

$$T_G = T_0 + \frac{Q}{c_p} = 2192 \text{ К}$$

$$p_G = p_0,$$

$$v_G \approx 7.3v_0$$

$$H_G = c_{p0}T_0 + c_p(T_G - T_0) = H_0 \approx 23100 \text{ кал/моль}$$

Очевидно, что термодинамический КПД цикла Брайтона без предварительного сжатия смеси равен нулю, поскольку $H_G = H_0$, т.е. $\eta_{p=const} = 0$.

Сжигание смеси при $v = const$ приводит к следующим значениям температуры, давления и удельного объема в точке F (рис. 1):

$$T_F = T_0 + \frac{Q}{c_v} \approx 2600 \text{ К}$$

$$p_F = p_0 T_F / T_0 \approx 8.67 p_0$$

$$v_F = v_0.$$

Последующее изэнтропическое расширение продуктов от давления p_F до p_0 приводит к снижению температуры от T_F до $T_{F'} = T_F (p_F / p_0)^{-(\gamma-1)/\gamma} \approx 1769 \text{ К}$ и увеличению удельного объема от v_0 до $v_{F'} \approx 5.9v_0$. Энтальпия в точке F' принимает значение:

$$H_{F'} = c_{p0}T_0 + c_p(T_{F'} - T_0) \approx 18406 \text{ кал/моль.}$$

Подставляя величину $H = H_{F'}$ в соотношение для η , получаем КПД цикла Хампри:

$$\eta_{v=const} = \frac{H_0 - H_{F'}}{Q} \approx 0.224$$

Перейдем к рассмотрению детонационного цикла. В точке D давление, температура и удельный объем определяются соотношениями:

$$p_D = p_0 [1 + \gamma(M_{CJ}^2 - 1)/(\gamma + 1)] \approx 16.87 p_0$$

$$T_D = T_0 \left(\frac{p_D}{M_{CJ} p_0} \right)^2 \approx 2853 \text{ К}$$

$$v_D = v_0 \left(\frac{T_D}{T_0} \frac{p_0}{p_D} \right) \approx 0.564 v_0$$

$$M_{CJ} = \sqrt{1 + (\gamma + 1)Q / 2c_p T_0} + \sqrt{(\gamma + 1)Q / 2c_p T_0} \approx 5.47$$

где M_{CJ} - число Маха самоподдерживающейся детонационной волны Чепмена-Жуге. В процессе изэнтропического расширения от давления p_D до p_0 температура продуктов падает от T_D до $T_{D'} = T_D (p_D / p_0)^{-(\gamma-1)/\gamma} \approx 1723 \text{ К}$, а удельный объем возрастает до $v_{D'} \approx 5.74v_0$. В результате получаем значение энтальпии в конечном состоянии D': $H_{D'} = c_{p0}T_0 + c_p(T_{D'} - T_0) = 17895 \text{ кал/моль}$. Подставляя величину $H = H_{D'}$ в соотношение для η , получаем КПД детонационного цикла:

$$\eta_d = \frac{H_0 - H_{D'}}{Q} \approx 0.248$$

Сравнивая КПД рассмотренных циклов, видим, что

$$\eta_d > \eta_{N=const} > \eta_{p=const}$$

Поскольку $T_{D'} \approx 1723 \text{ К}$, $T_{E'} \approx 1769 \text{ К}$ и $T_{G'} = 2192 \text{ К}$, соотношение между изменением энтропии в соответствующих процессах теперь обосновано количественно.

Таким образом, детонация – самый эффективный из всех возможных способов прямого сжигания вещества. Именно поэтому в настоящее время активно разворачиваются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в новых системах реактивного движения и в энергетике.

Литература

1. Зельдович Я. Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ. 1940. Т. 10. № 17. С. 1453-1461.