То время τ_1, которое потребуется, чтобы достичь нужной скорости, находится из уравнения

$$\frac{1}{\sqrt{3}}c\varepsilon_0 - \frac{1}{2}c\varepsilon_0 = a\tau_1 \quad \Rightarrow \quad \tau_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{1}{2}\right)\frac{l}{c} \approx 0{,}1\frac{l}{c} \tag{32}$$

Прибавляя время разгона τ_0, получим окончательную оценку искомого времени

$$\tau = 1{,}1\frac{l}{c}. \tag{33}$$

В заключение отметим, что результат зависит от используемой модели, однако можно считать, что оценка времени в общем виде имеет вид

$$\tau = A\frac{l}{c}. \tag{34}$$

Где A - безразмерный коэффициент незначительно превышающий 1.

Задача 10-2

0. Уравнение адиабаты

С учётом уравнения состояния идеального газа уравнение адиабаты может быть преобразовано к виду

$T^k \cdot p^{(1-k)} = const$ Или к виду $T \cdot V^{(k-1)} = const$

1. Цикл Отто

1.1 Найдем параметры рабочего тела во всех характерных точках цикла.

Точка 2

$\boldsymbol{V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon}}$ $\quad \boldsymbol{p_2} = p_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = \boldsymbol{p_1\varepsilon^k}$ $\quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}$ откуда получаем

$\boldsymbol{T_2 = T_1\varepsilon^{k-1}}$

Точка 3.

$\boldsymbol{V_3 = V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon}}$ $\quad \boldsymbol{p_3} = p_2\lambda = \boldsymbol{p_1\varepsilon^k\lambda}$ $\quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda$ откуда получаем

$\boldsymbol{T_3} = T_2\lambda = \boldsymbol{T_1\varepsilon^{k-1}\lambda}$

Точка 4.

$\boldsymbol{V_4 = V_1}$ $\quad \boldsymbol{p_4} = p_3\left(\frac{V_3}{V_4}\right)^k = p_3\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^k = \frac{p_3}{\varepsilon^k} = \boldsymbol{p_1\lambda}$

$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$ откуда получаем

$\boldsymbol{T_4} = T_3\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = \boldsymbol{T_1\varepsilon^{k-1}}\lambda\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = \boldsymbol{T_1\lambda}$

1.2 Количество подведенной и отведенной теплоты определяются по формулам:

$q_1 = C_V(T_3 - T_2)$, $|q_2| = C_V(T_4 - T_1)$

или

$q_1 = U_3 - U_2 = \frac{3}{2}(p_3V_3 - p_2V_2)$, $|q_2| = U_4 - U_1 = \frac{3}{2}(p_4V_4 - p_1V_1)$

Подставляя эти значения теплот в формулу для термического КПД, получим:

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{C_V(T_4 - T_1)}{C_V(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad \text{или} \quad \eta_t = 1 - \frac{p_4 V_4 - p_1 V_1}{p_3 V_3 - p_2 V_2}$$

С учетом найденных значений параметров формула для КПД примет вид

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

2. Цикл Дизеля

2.1 Параметры рабочего тела в характерных точках цикла будут:

Точка 2

$V_2 = \frac{V_1}{\varepsilon}$, $\quad p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = p_1 \varepsilon^k$, $\quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}$ откуда получаем

$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$

Точка 3

$V_3 = \rho V_2 = \frac{\rho V_1}{\varepsilon}$, $\quad p_3 = p_2 = p_1 \varepsilon^k$, $\quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \rho$ откуда получаем:

$T_3 = \rho T_2 = T_1 \rho \varepsilon^{k-1}$

Точка 4

$V_4 = V_1$, $\quad p_4 = p_3 \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^k = p_1 \varepsilon^k \left(\frac{\rho V_1}{\varepsilon V_1}\right)^k = p_1 \rho^k$,

$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^{k-1}$ Так как $\frac{V_3}{V_1} = \frac{\rho}{\varepsilon}$, то

$T_4 = T_3 \left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^{k-1} = T_1 \rho \varepsilon^{k-1} \left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^{k-1} = T_1 \rho^k$

2.2 Количество подведенной и отведенной теплот определяются по формулам:

$q_1 = C_p(T_3 - T_2)$, $\quad |q_2| = C_V(T_4 - T_1)$

или $\quad q_1 = U_3 - U_2 + A_{23} = \frac{3}{2}(p_3 V_3 - p_2 V_2) + p_3(V_3 - V_2)$,

$|q_2| = U_4 - U_1 = \frac{3}{2}(p_4 V_4 - p_1 V_1)$

Термический кпд цикла в предположении постоянства теплоемкостей C_p и C_V и их отношения

$k = \frac{C_p}{C_V}$ будет: $\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{C_V(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)}$ или

Подставляя полученные значения температур в формулу для термического КПД, получим

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k \varepsilon^{k-1}(\rho - 1)}$$

3. Сравнение циклов Отто и Дизеля

4.1 Определим параметры P/P_0 и V/V_0 для характерных точек обоих циклов.

Цикл Отто

$\frac{V_1}{V_0} = 30{,}0$ - по условию, $\frac{P_1}{P_0} = 1{,}00$ – по графику изотермы для T_{min}, так как в точке 1 температура и давление должны быть минимальны .

Так как степень сжатия для цикла Отто $\varepsilon_V = 5{,}00$, то $\frac{V_2}{V_0} = \frac{V_3}{V_0} = 6{,}00$. В точке 3 давление должно быть максимальным. В цикле Отто максимальному давлению соответствует максимальная температура. По графику изотермы для T_{max} находим $\frac{P_3}{P_0} = 30{,}0$

Используя уравнение адиабаты, найдём $\frac{P_2}{P_0}$ и $\frac{P_4}{P_0}$.

$$\frac{P_2}{P_0}\left(\frac{V_2}{V_0}\right)^k = \frac{P_1}{P_0}\left(\frac{V_1}{V_0}\right)^k, \qquad \frac{P_2}{P_0} = \frac{P_1}{P_0}\varepsilon^k = 1{,}00 \cdot 5{,}00^{1{,}67} = 14{,}7$$

$$\frac{P_4}{P_0}\left(\frac{V_4}{V_0}\right)^k = \frac{P_3}{P_0}\left(\frac{V_3}{V_0}\right)^k, \qquad \frac{P_4}{P_0} = \frac{P_3}{P_0}\frac{1}{\varepsilon^k} = \frac{30{,}0}{5{,}00^{1{,}67}} = 2{,}04$$

$$\frac{V_4}{V_0} = \frac{V_1}{V_0} = 30{,}0$$

Наносим точки с найденными параметрами на диаграмму и соединяем в цикл Отто. Точку 2 данного цикла обозначим 2_V. Целесообразно просчитать по несколько промежуточных точек на адиабатах 1-2 и 3-4 для более точного изображения этих процессов.

Цикл Дизеля.

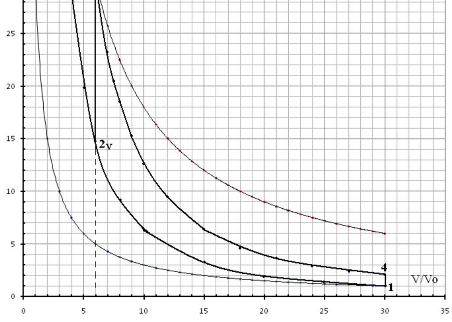
Исходя из условия, следует, что параметры точек 1, 3 и 4 циклов Отто и Дизеля будут совпадать. Для цикла Дизеля $\frac{P_2}{P_0} = \frac{P_3}{P_0} = 30{,}0$. Параметры объёма в точке 2 цикла Дизеля определим, используя уравнение адиабаты. Адиабата 1 – 2 цикла Отто должна лежать на адиабате 1 – 2 цикла Дизеля.

$$\frac{P_2}{P_0}\left(\frac{V_2}{V_0}\right)^k = \frac{P_1}{P_0}\left(\frac{V_1}{V_0}\right)^k \quad \frac{V_2}{V_0} = \frac{V_1}{V_0}\left(\frac{P_1}{P_0}\frac{P_0}{P_2}\right)^{\frac{1}{k}} = 30{,}0 \cdot \left(\frac{1}{30{,}0}\right)^{\frac{1}{1{,}67}} = 3{,}91$$

Наносим точку 2 цикла Дизеля на диаграмму и достраиваем данный цикл. Точку 2 цикла Дизеля обозначим 2_P.

4.2 Термический КПД цикла Отто: $\eta_{tV} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{5{,}00^{1{,}67-1}} = 66{,}0\%$

Для расчёта термического КПД цикла Дизеля необходимо определить степень сжатия ε_P и степень предварительного расширения ρ.



$$\varepsilon_p = \frac{V_1}{V_0} \cdot \frac{V_0}{V_{2p}} = \frac{30{,}0}{3{,}91} = 7{,}67$$

$$\rho = \frac{V_3}{V_{2p}} = \frac{6{,}00}{3{,}91} = 1{,}53$$

$$\boldsymbol{\eta_{tp}} = 1 - \frac{\rho^k - 1}{k\varepsilon^{k-1}(\rho - 1)} = 1 - \frac{1{,}53^{1{,}67} - 1}{1{,}67 \cdot 7{,}67^{1{,}67-1} \cdot (1{,}53 - 1)} = \mathbf{70{,}2}$$