

Исходные параметры

$$\gamma_1 := 1.32 \quad \gamma_2 := k \quad P_1 := 1.1 \cdot 10^5 \text{ Па} \quad t_1 := 10^\circ\text{C} \quad \frac{P_2}{P_1} := 9 \quad \frac{P_3}{P_2} := 1.33 \quad R_{\text{кр}} := 8314$$

1. Определяем характеристики смеси

$$m_{\text{CO}_2} := 3 \text{ кг} \quad m_{\text{H}_2\text{O}} := 1.75 \text{ кг} \quad m_{\text{O}_2} := 1.3 \text{ кг} \quad m_{\text{N}_2} := 17 \text{ кг}$$

Находим массу смеси

$$m_{\text{см}} := m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{O}_2} + m_{\text{N}_2} = 23.05 \text{ кг}$$

Находим массовые доли компонентов

$$\omega_{\text{CO}_2} := \frac{m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{см}}} = 0.1302$$

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} := \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{см}}} = 0.0759$$

$$\omega_{\text{O}_2} := \frac{m_{\text{O}_2}}{m_{\text{см}}} = 0.0564$$

$$\omega_{\text{N}_2} := \frac{m_{\text{N}_2}}{m_{\text{см}}} = 0.7375$$

$$\omega_{\text{см}} := \omega_{\text{CO}_2} + \omega_{\text{H}_2\text{O}} + \omega_{\text{O}_2} + \omega_{\text{N}_2} = 1 \quad \text{—условие выполняется}$$

Молярные массы компонентов

$$m_{\text{CO}_2_кг} := 44 \frac{\text{кг}}{\text{Кмоль}} \quad m_{\text{H}_2\text{O}_кг} := 18 \frac{\text{кг}}{\text{Кмоль}} \quad m_{\text{O}_2_кг} := 32 \frac{\text{кг}}{\text{Кмоль}} \quad m_{\text{N}_2_кг} := 28 \frac{\text{кг}}{\text{Кмоль}}$$

Находим количество вещества компонентов

Пояснение

$$n_{\text{CO}_2} := \frac{m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{CO}_2_кг}} = 0.0682 \text{ Кмоль}$$

кг- крышка

$$n_{\text{H}_2\text{O}} := \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}_кг}} = 0.0972 \text{ Кмоль}$$

$$n_{\text{O}_2} := \frac{m_{\text{O}_2}}{m_{\text{O}_2_кг}} = 0.0406 \text{ Кмоль}$$

$$n_{\text{N}_2} := \frac{m_{\text{N}_2}}{m_{\text{N}_2_кг}} = 0.6071 \text{ Кмоль}$$

Находим количество вещества смеси

$$n_{\text{см}} := n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} = 0.8132$$

Молярная масса смеси

$$m_{\text{см}_кг} := \frac{m_{\text{см}}}{n_{\text{см}}} = 28.3458$$

Находим массовые доли компонентов

$$\chi_{\text{CO}_2} := \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{см}}} = 0.0838$$

$$\chi_{\text{H}_2\text{O}} := \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{см}}} = 0.1196$$

$$\chi_{\text{O}_2} := \frac{n_{\text{O}_2}}{n_{\text{см}}} = 0.05$$

$$\chi_{\text{N}_2} := \frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{см}}} = 0.7466$$

$$\chi_{\text{см}} := \chi_{\text{CO}_2} + \chi_{\text{H}_2\text{O}} + \chi_{\text{O}_2} + \chi_{\text{N}_2} = 1 \quad \text{— условие выполняется}$$

Находим удельные газовые постоянные компонентов

$$R_{\text{CO}_2} := \frac{R_{\text{кр}}}{m_{\text{CO}_2_{\text{кр}}}} = 188.9545 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$R_{\text{H}_2\text{O}} := \frac{R_{\text{кр}}}{m_{\text{H}_2\text{O}_{\text{кр}}}} = 461.8885 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$R_{\text{O}_2} := \frac{R_{\text{кр}}}{m_{\text{O}_2_{\text{кр}}}} = 259.8125 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$R_{\text{N}_2} := \frac{R_{\text{кр}}}{m_{\text{N}_2_{\text{кр}}}} = 296.9286 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Находим удельную газовую постоянную смеси

$$R_{\text{см}} := R_{\text{CO}_2} \cdot \omega_{\text{CO}_2} + R_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \omega_{\text{H}_2\text{O}} + R_{\text{O}_2} \cdot \omega_{\text{O}_2} + R_{\text{N}_2} \cdot \omega_{\text{N}_2} = 293.3063 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{К}}$$

Находим теплоёмкость компонентов при постоянном давлении и $t := t_1$

$$C_{p_{\text{CO}_2_{\text{кр}}}} := 36.05 + 0.0203 \cdot t - 0.00000642t^2$$

$$C_{p_{\text{H}_2\text{O}_{\text{кр}}}} := 32.85 + 0.00544 \cdot t$$

$$C_{p_{\text{O}_2_{\text{кр}}}} := 29.56 + 0.003404 \cdot t$$

$$C_{p_{\text{N}_2_{\text{кр}}}} := 28.97 + 0.002566 \cdot t$$

Находим молярную изобарную теплоёмкость смеси

$$C_{p_{\text{крсм}}} := \chi_{\text{CO}_2} \cdot C_{p_{\text{CO}_2_{\text{кр}}}} + \chi_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{p_{\text{H}_2\text{O}_{\text{кр}}}} + \chi_{\text{O}_2} \cdot C_{p_{\text{O}_2_{\text{кр}}}} + \chi_{\text{N}_2} \cdot C_{p_{\text{N}_2_{\text{кр}}}} = 30.101$$

Удельная изобарная теплоёмкость смеси

$$C_p := \frac{C_{p_{\text{крсм}}}}{m_{\text{см}_{\text{кр}}}} \cdot 10^3 = 1061.933 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Из уравнения Майера найдём C_v

$$C_v := C_p - R_{\text{см}} = 768.6267 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Показатель адиабаты

$$k := \frac{C_p}{C_v} = 1.3816$$

2. Определяем параметры газовой смеси (P,V,T) во всех точках

Определяем параметры газовой смеси (P,V,T) в точке 1

Процесс 1-2 политропный с показателем политропы

Определяем объём V1 из уравнения состояния PV=RT

$$T1 := t1 + 273$$

$$V1 := \frac{R_{см} \cdot T1}{P1} = 0.7546 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Воспользуемся формулами соотношения для политропных процессов

$$\frac{P2}{P1} := \left(\frac{V1}{V2}\right)^\gamma \quad \frac{T2}{T1} := \left(\frac{V1}{V2}\right)^{\gamma-1} \quad \frac{T2}{T1} := \left(\frac{P2}{P1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$V2 := \frac{V1}{\frac{1}{(9)^{\frac{1}{\gamma}}}} = 0.1428 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad P2 := P1 \left(\frac{V1}{V2}\right)^{\gamma} = 9.9 \times 10^5 \text{ Па}$$

$$\frac{P2}{P1} = 9$$

$$T2 := T1 \cdot \left(\frac{V1}{V2}\right)^{(\gamma-1)} = 482.0787 \text{ К}$$

$$P3 := 1.33P2 = 1.3167 \times 10^6$$

В точке 3 процесс изохорный, следовательно $V3 := V2 = 0.1428 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

Определяем давление P1 из уравнения состояния PV=RT

$$T3 := \frac{V3 \cdot P3}{R_{см}} = 641.1647 \text{ Па}$$

$$t3 := T3 - 273 = 368.1647 \text{ С}$$

Процесс 3-4 адиабатический с показателем адиабаты $\gamma2 := k = 1.3816$

$$V4 := V1 = 0.7546 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$T4 := T3 \cdot \left(\frac{V3}{V4}\right)^{\gamma2-1} = 339.7099 \text{ К}$$

$$P4 := P3 \left(\frac{V3}{V4}\right)^{\gamma2} = 1.3204 \times 10^5 \text{ Па}$$

$$C_{p1} := 1.0503089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2$$

$$C_{v1} := 0.757089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2$$

3. Строим графики зависимости истинной удельной теплоёмкости C_p и C_v от 0 градусов Цельсия до t_{max} цикла

$$t := 0$$

$$C_p := 1.0503089 + 0.000156755t - 0.00000001894t^2 = 1.0503 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_v := 0.757089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2 = 0.7571 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$t := 100$$

$$C_p := 1.0503089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2 = 1.0657 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_v := 0.757089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2 = 0.7724 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$t := 200$$

$$C_p := 1.0503089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2 = 1.0807 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_v := 0.757089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2 = 0.7874 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$t := 300$$

$$C_p := 1.0503089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2 = 1.0953 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_v := 0.757089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2 = 0.802 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$t := 368$$

$$C_p := 1.0503089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2 = 1.105 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$C_v := 0.757089 + 0.0001555t - 0.00000001894t^2 = 0.8117 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

4. Для процесса 2-3 определяем удельные значения q , ΔU , Δh с учетом зависимости теплоёмкости от температуры.

Процесс 2-3 изохорный следовательно $l=0$; $v_2 := v_3 = 0.1428 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

$$P_2 = 9.9 \times 10^5 \text{ Па} \quad P_3 = 1.3167 \times 10^6 \text{ Па} \quad T_2 = 482.0787 \text{ К} \quad T_3 = 641.1647 \text{ К}$$

$$q := \Delta U \quad \Delta U := C_v(T) dT \quad \Delta h := C_p(T) dT \quad t_2 := T_2 - 273 = 209.0787$$

$$f(t) := C_{p1} \quad f_l(t) := C_{v1} \quad t_3 = 368.1647$$

$$\Delta h_1 := \int_{t_2}^{t_3} f(t) dt = 167.3365 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

$$\Delta U1 := \int_{t2}^{t3} f1(t) dt = 120.6893 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$q1 := \Delta U1$$

$$\Delta h(T2) := C_p(T2) dT$$

$$\Delta h2 := (1.0503089 + 0.0001555t2 - 0.00000001894t2^2) \cdot (t3 - t2) = 172.1299 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta U := C_v(T2) dT$$

$$\Delta U2 := (0.757089 + 0.0001555t2 - 0.00000001894t2^2) \cdot (t3 - t2) = 125.4827 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$q2 := \Delta U2$$

Найдём разницу вычисленных процессов

$$\Delta h := \Delta h1 - \Delta h2 = -4.7934 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta U1 := \Delta U1 - \Delta U2 = -4.7934$$

$$q1 := q1 - q2 = -4.7934 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

5. Рассчитываем удельные значения L, количества теплоты q, изменения внутренней энергии ΔU, энтальпии Δh и коэффициента распределения теплоты ψ

Процесс 1-2 политропный с показателем политропы $\gamma_1 := 1.32$ $C_v := 0.7686267$ $C_p := 1.061933$

$$112 := \frac{\left[\frac{1}{\gamma_1 - 1} \cdot (P1 \cdot V1 - P2 \cdot V2) \right]}{10^3} = -182.472 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta U12 := C_v \cdot (T2 - T1) = 153.0172 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$q12 := \Delta U12 + 112 = -29.4548 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta h12 := C_p \cdot (T2 - T1) = 211.4083 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta S12 := C_v \cdot \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 - 1} \cdot \ln\left(\frac{T2}{T1}\right) = -0.0788 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Psi_{12} := \frac{\Delta U12}{q12} = -5.195$$

Процесс 2-3 изохорный

Примечание

деление на 10^3 сделано специально, чтобы перевести джоули в килоджоули

$$\begin{aligned}
l_{23} &:= 0 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
\Delta U_{23} &:= C_v \cdot (T_3 - T_2) = 122.2777 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
q_{23} &:= \Delta U_{23} = 122.2777 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
\Delta h_{23} &:= C_p \cdot (T_3 - T_2) = 168.9386 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
\Delta S_{23} &:= C_v \cdot \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) = 0.2192 \quad \Psi_{23} := \frac{\Delta U_{23}}{q_{23}} = 1 \\
\text{Процесс 3-4 адиабатический с показателем адиабаты } \gamma^2 &:= k \\
l_{34} &:= \frac{\left[\frac{1}{\gamma^2 - 1} \cdot (P_3 \cdot V_3 - P_4 \cdot V_4) \right]}{10^3} = 231.7062 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
\Delta U_{34} &:= C_v \cdot (T_4 - T_3) = -231.7062 \quad \text{К} \\
q_{34} &:= 0 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
\Delta h_{34} &:= C_p \cdot (T_4 - T_3) = -320.124 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
\Delta S_{34} &:= C_v \cdot \frac{\gamma^2 - k}{\gamma^2 - 1} \cdot \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) = 0 \quad \Psi_{12} := \frac{\Delta U_{34}}{q_{34}} = 1
\end{aligned}$$

Процесс 4-1 изохорный

$$\begin{aligned}
l_{41} &:= 0 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
\Delta U_{41} &:= C_v \cdot (T_1 - T_4) = -43.5888 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
q_{41} &:= \Delta U_{41} = -43.5888 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
\Delta h_{41} &:= C_p \cdot (T_1 - T_4) = -60.2222 \quad \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} \\
\Delta S_{41} &:= C_v \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_4}\right) = -0.1404 \quad \Psi_{23} := \frac{\Delta U_{41}}{q_{41}} = 1
\end{aligned}$$

6. Определяем количество подведённой (q_1) и отведённой (q_2) теплоты, а также алгебраические суммы L , количества теплоты q , изменения внутренней энергии ΔU , энтальпии Δh .

$$l_{\text{sum}} := l_{12} + l_{23} + l_{34} + l_{41} = 49.2341$$

$$\begin{aligned}
 q_{\text{sum}} &:= q_{12} + q_{23} + q_{34} + q_{41} = 49.2341 && = 0 \\
 \Delta U_{\text{sum}} &:= \Delta U_{12} + \Delta U_{23} + \Delta U_{34} + \Delta U_{41} = -1.4211 \times 10^{-14} && = 0 \\
 \Delta h_{\text{sum}} &:= \Delta h_{12} + \Delta h_{23} + \Delta h_{34} + \Delta h_{41} = 5.6843 \times 10^{-14} && = 0 \\
 \Delta S_{\text{sum}} &:= \Delta S_{12} + \Delta S_{23} + \Delta S_{34} + \Delta S_{41} = 0 \\
 \underline{q}_1 &:= q_{23} = 122.2777 \\
 \underline{q}_2 &:= q_{12} + q_{41} = -73.0436
 \end{aligned}$$

7. Строим графики функции процессов