

## Задача №1. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном давлении или постоянном объеме определить параметры рабочего тела в характерных точках цикла, полную работу, количество подведенной и отведенной теплоты, термических КПД цикла. Изобразить цикл двигателя в  $p-v$  и  $T-s$  диаграммах. Константы рабочего тела (продуктов сгорания) принять по воздуху. Удельную теплоемкость воздуха принять независимой от температуры и равной  $c_p = 1,04$  кДж/(кг·К),  $k = c_p/c_v = 1,4$ .

Начальное давление  $p_1$  принять равным атмосферному, начальную температуру  $t_1$  – равной температуре окружающего воздуха.

Данные для решения задачи выбрать из табл. 1.

Таблица 1

Данные для расчета цикла ДВС

№ варианта	$\varepsilon$	$\lambda$	$\rho$	$t_1, ^\circ\text{C}$	Атмосферное давление, мм.рт.ст
1	11	-	2,2	5	750

### Решение:

Определим  $c_v = c_p/k = 1,04/1,4 = 0,743$  кДж/(кг·К),  $R = c_p - c_v = 1,04 - 0,743 = 0,297$  кДж/(кг·К).

1) Определим параметры в характерных точках цикла.

а) точка 1, зная  $P_1 = 750$  мм.рт.ст,  $t_1 = 5$  °С, зная что 1 мм.рт.ст. = 133,3 Па  $P_1 = 750 \cdot 133,32 = 99975$  Па = 0,99975 бар,  $T_1 = 5 + 273 = 288$  К

определим значение  $v_1$

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{P_1} = \frac{297 \cdot 278}{99975} = 0,8259 \text{ м}^3/\text{кг}$$

б) точка 2, так как процесс 1-2 адиабатный,  $k = 1,4$

$$v_2 = v_1 / \varepsilon = 0,8259 / 11 = 0,0751 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$P_2 = P_1 \cdot \varepsilon^k = 0,99975 \cdot 11^{1,4} = 28,697 \text{ бар}$$

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 278 \cdot 11^{1,4-1} = 725,4 \text{ К} = 452,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

в) точка 4, процесс 3-4 изобарный

$$P_3 = P_2 = 22,697 \text{ бар}$$

$$v_3 = v_2 \cdot \rho = 0,0751 \cdot 2,2 = 0,1652 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$T_4 = \rho \cdot \lambda \cdot T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 2,2 \cdot 1 \cdot 278 \cdot 11^{1,4-1} = 1596,0 \text{ К} = 1323,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

г) точка, процесс 3-4 адиабатный, процесс 4-1 изохорный

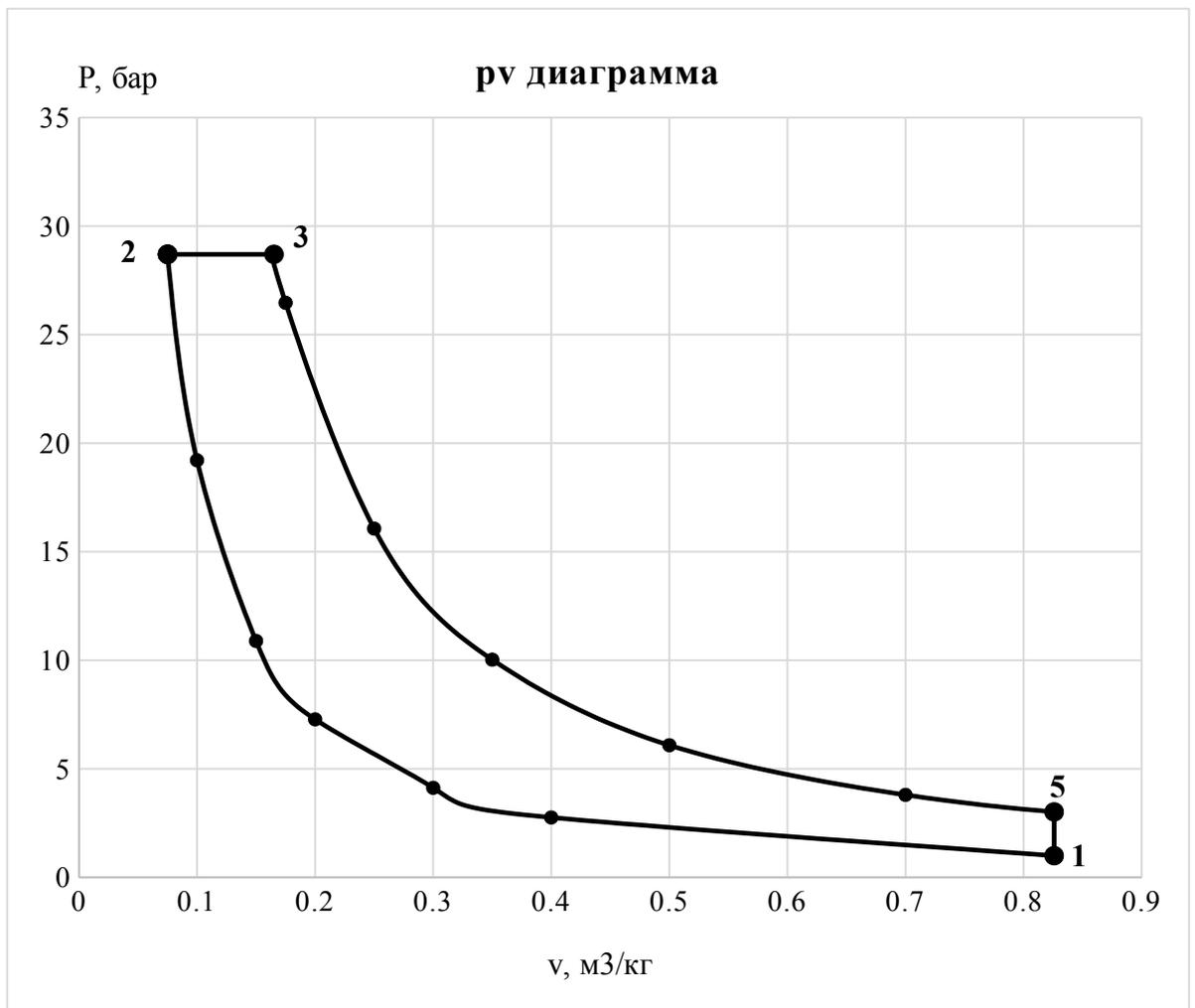
$$v_4 = v_1 = 0,8259 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$P_4 = \rho^k \cdot \lambda \cdot P_1 = 2,2^{1,4} \cdot 1 \cdot 0,99975 = 3,015 \text{ бар}$$

$$T_4 = \rho^{k-1} \cdot \lambda \cdot T_1 = 2,2^{1,4-1} \cdot 1 \cdot 278 = 838,4 \text{ К} = 565,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Полученные результаты сведем в таблицу

Точка	1	2	3	4
$P$ , бар	0,99975	28,697	28,697	3,015
$v$ , м <sup>3</sup> /кг	0,8259	0,0751	0,1652	0,8259
$T$ , К	278,0	725,4	1596,0	838,4
$t$ , °C	5,0	452,4	1323,0	565,4



2) Полезная работа цикла

$$l_0 = \frac{R}{k-1}(T_3 - T_2) - \frac{R}{k-1}(T_4 - T_1) =$$

$$= \frac{0,297}{1,4-1}(1596,0 - 725,4) - \frac{0,297}{1,4-1}(838,4 - 278) = 488,84 \text{ кДж/кг}$$

3) Количество подведенной, отведенной и полезной теплоты

количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_p \cdot (T_4 - T_3) = 1,04 \cdot (1596,0 - 725,4) = 905,35 \text{ кДж/кг}$$

количество отведенной теплоты

$$q_2 = c_v \cdot (T_4 - T_1) = 0,743 \cdot (838,4 - 278) = 416,36 \text{ кДж/кг}$$

Полезная работа цикла

$$l = l_0 = q_1 - q_2 = 905,35 - 416,36 = 488,99 \text{ кДж/кг}$$

4) термический КПД

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{488,84}{905,35} = 0,540$$

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

$$= 1 - \frac{1}{11^{1,4-1}} \cdot \frac{(2,2^{1,4} \cdot 1 - 1)}{1,4 \cdot 1(2,2 - 1)} = 0,540$$

Вопросы

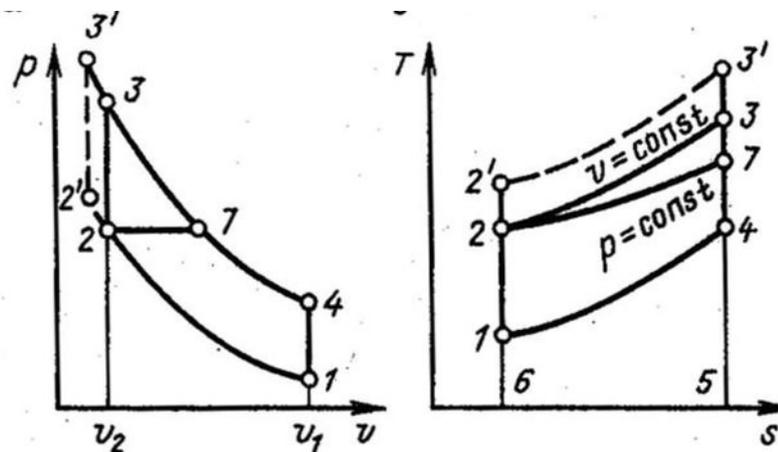
1) Как влияет степень сжатия на термический КПД цикла?

При повышении степени сжатия КПД цикла увеличивается. Это видно из формулы цикла с подводом теплоты при постоянном объеме

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

2) КПД какого цикла (при  $p = \text{const}$  или  $v = \text{const}$ ) больше при одинаковых степенях сжатия? Ответы иллюстрировать изображением циклов в  $p-v$  и  $T-s$  диаграммах.

КПД цикла  $v = \text{const}$  больше при одинаковых степенях сжатия.



3) Как изменится КПД ДВС с уменьшением показателя адиабаты  $k$ ?

При уменьшении показателя адиабаты  $k$ , для уравнения КПД величина знаменателя уменьшается, соответственно уменьшается и значение КПД.

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

**Задача №2 Второй закон термодинамики.  
Изменение энтропии в равновесных процессах.**

Газ массой  $M$  имеет начальные параметры - давление  $p_1$ , и температуру  $t_1$ . После политропного изменения состояния объем газа стал  $V_2$  а давление  $p_2^{\text{пол}}$ . Определите характер процесса (расширение или сжатие газа), показатель политропы  $n$ , конечную температуру  $t_2$ , теплоемкость политропного процесса  $c$ , работу и теплоту в процессе, а также изменение внутренней энергии и энтропии газа. Определите эти же величины и конечное давление  $p_2$ , если изменение состояния газа до того же объема  $V_2$  происходит: а) по изотерме и б) по адиабате. Составьте сводную таблицу результатов расчета, изобразите совмещено все процессы в  $pV$ - и  $Ts$ - диаграммах.

Данные для решения задачи выберите из таблицы 2.

Предпоследняя цифра шифра	Газ	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{МПа}^3$	Последняя цифра шифра	$M, \text{кг}$	$p_2^{\text{пол}}, \text{МПа}$	$V_2, \text{м}^3$
0	$\text{NH}_3$	100	0,5	0	5,0	0,25	3,3
1	$\text{O}_2$	150	0,55	1	10,0	0,32	4,6

**Решение**

Молярная масса  $\text{NH}_3$   $\mu_{\text{NH}_3} = 17 \text{ кг/кмоль}$ .

Газовая постоянная  $\text{NH}_3$ :

$$R_{\text{NH}_3} = \mu R / \mu_{\text{NH}_3} = 8314/17 = 489,1 \text{ Дж/кг К} = 0,4891 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$$

Изохорная теплоемкость  $\text{NH}_3$ ,  $k = 1,33$  – показатель адиабаты для многоатомного газа

$$c_v = \frac{R}{k - 1} = \frac{489,1}{1,33 - 1} = 1482$$

$$\text{Дж/кг К} = 1,482 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$$

Изобарная теплоемкость  $\text{NH}_3$ ,  $k = 1,33$  – показатель адиабаты для многоатомного газа

$$c_p = \frac{kR}{k - 1} = \frac{1,33 \cdot 489,1}{1,33 - 1} = 1971$$

$$\text{Дж/кг К} = 1,971 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$$

Объем  $V_1$  аммиака найдем из уравнения состояния

$$pV = M \cdot R \cdot T$$

$$V_1 = \frac{M \cdot R \cdot T_1}{p_1} = \frac{10,0 \cdot 489,1 \cdot (100 + 273)}{0,5 \cdot 10^6} = 3,648$$

к2

Так  $V_1 < V_2$ , то происходит расширения газа

Показатель политропы определим из соотношения

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2^n}{v_1^n}$$

Прологарифмируем выражение

$$\ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) = n \cdot \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$$

откуда показатель политропы

$$n = \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) / \ln \left( \frac{v_2}{v_1} \right)$$

Отсюда

$$n = \ln \left( \frac{0,5}{0,32} \right) / \ln \left( \frac{4,6}{3,468} \right) = 1,926$$

Температура в конце процесса

$$T_2 = \frac{V_2 \cdot p_2}{M \cdot R} = \frac{0,32 \cdot 10^6 \cdot 4,6}{10,0 \cdot 489,1} = 301,0$$

$$K = 28,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Количество теплоты

$$Q = c \cdot M \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 0,954 \cdot (28,0 - 100) = -686,7 \text{ кДж}$$

Теплоемкость политропного процесса

$$c = c_v \frac{n - k}{n - 1} = 1,482 \frac{1,926 - 1,33}{1,926 - 1} = 0,954$$

Работа в политропном процессе

$$L = \frac{MR}{n - 1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{10 \cdot 0,4891}{1,926 - 1} (100 - 28,0) = 380,53$$

кДж/кг

Работа

$$L = R / (n - 1) \cdot M \cdot (T_1 - T_2) = 0,4891 / (1,926 - 1) \cdot 10 \cdot (28,0 - 100) = 380 \text{ кДж}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 1,482 \cdot (28,0 - 100) = -1067,24 \text{ кДж}$$

Изменение энтропии

$$\Delta S = M \left( c_v \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - R \cdot \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right) \right) = 10 \left( 1,482 \cdot \ln \left( \frac{301,0}{373} \right) - 0,4891 \cdot \ln \left( \frac{0,32}{0,5} \right) \right) =$$
$$= -0,996 \text{ кДж/К}$$

а) изотермический процесс

Параметры конечного состояния газа

$$p_2 = p_1 V_1 / V_2 = 0,5 \cdot 3,468 / 4,6 = 0,3966 \text{ МПа}$$

$$T_2 = T_1 = (100 + 273) = 373 \text{ К} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

Количество теплоты

$$Q = M \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \left( \frac{4,6}{3,648} \right) = 10 \cdot 0,4891 \cdot 373 \cdot \ln \left( \frac{4,6}{3,648} \right) = 422,8 \text{ кДж}$$

Работа

$$L = Q = 422,8 \text{ кДж}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 1,482 \cdot (373 - 373) = 0$$

Изменение энтропии

$$\Delta S = M \cdot R \cdot \ln(\varepsilon) = 10 \cdot 0,4891 \cdot \ln \left( \frac{4,6}{3,648} \right) = 1,336 \text{ кДж}$$

б) адиабатный процесс

Параметры конечного состояния газа

$$p_2 = p_1 / \varepsilon^k = 0,5 / 1,261^{1,33} = 0,367 \text{ МПа}$$

$$T_2 = T_1 / \varepsilon^{k-1} = (100 + 273) / 1,261^{1,33-1} = 345,6 \text{ К} = 72,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Количество теплоты

$$Q = 0 \text{ кДж}$$

Работа

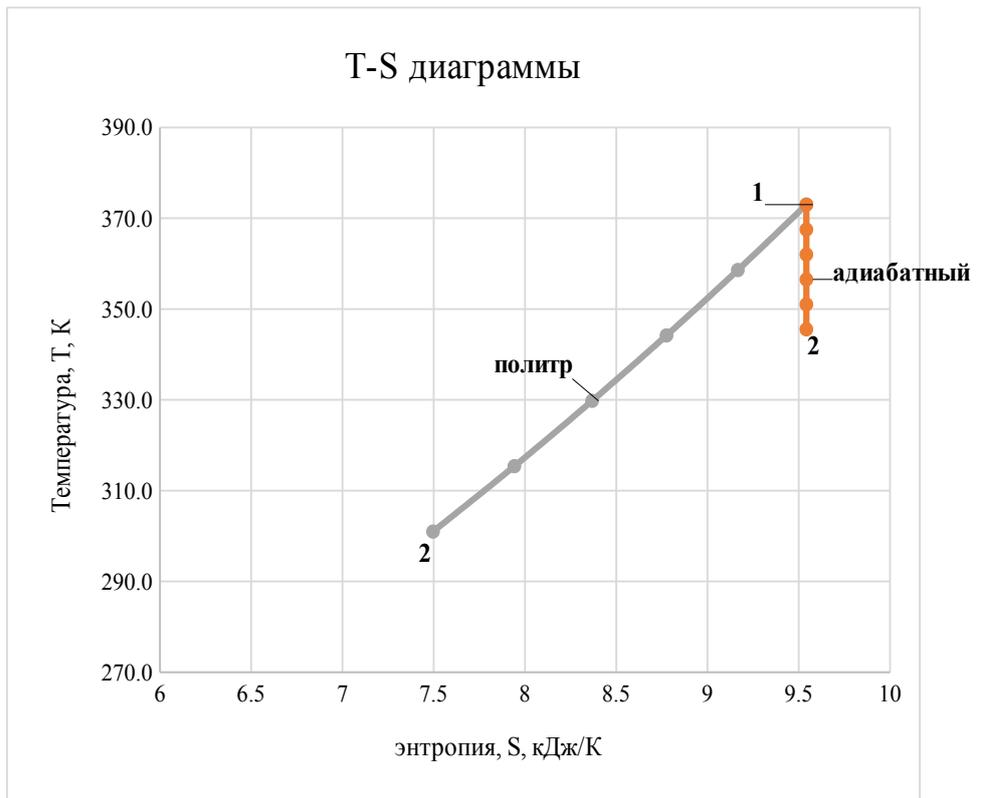
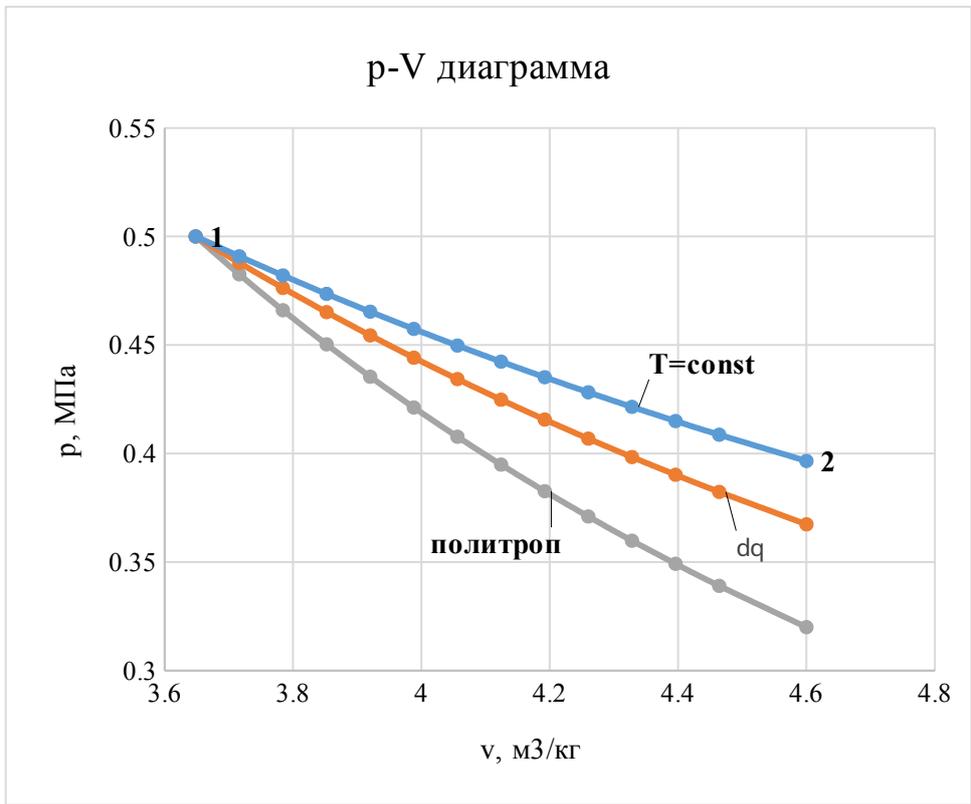
$$L = R / (k - 1) \cdot M \cdot (T_1 - T_2) = 0,4891 / (1,33 - 1) \cdot 10 \cdot (100 - 72,5) = 407,0 \text{ кДж}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = c_v \cdot (T_2 - T_1) = 10 \cdot 1,482 \cdot (72,5 - 100) = -407,0 \text{ кДж}$$

Изменение энтропии

$$\Delta S = 0 \text{ кДж}$$



## Задача №1 Термодинамические процессы в идеальных

Газовая смесь массой  $M_1$ , заданная по объемному составу, нагревается при постоянном объеме  $V_1$  от температуры  $t_1$  до температур  $t_2$ , охлаждается при постоянном давлении до начальной температуры  $t_1$ .

Определите конечные давления и объем смеси, величину работы и теплоты, участвующих в процессах, изменение внутренней энергии и энтропии смеси в каждом процессе. Расчет иллюстрировать изображением процессов в  $pV$ - и  $Ts$ -координатах.

Данные для решения задачи выбрать из таблицы 1.

Предпоследняя цифра шифра	M, кг	$V_1, \text{ м}^3$	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	Последняя цифра шифра	Состав газовой смеси. %					
						$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}$	$\text{H}_2$
0	25	20	80	550	1	79	21	-	-	-	-

Примечание: Задачу решить с учетом зависимости теплоемкости газов от температуры.

### Молярные массы компонентов смеси

Газовая смесь состоит из  $\text{N}_2$   $\mu_{\text{N}_2} = 28$  кг/кмоль,  $\text{O}_2$   $\mu_{\text{CO}} = 28$  кг/кмоль,

Газовые постоянные отдельных компонентов смеси равны:

$$R_i = \mu R / \mu_i$$

$$R_{\text{N}_2} = \mu R / \mu_{\text{N}_2} = 8314 / 28 = 296,9 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$$

$$R_{\text{CO}} = \mu R / \mu_{\text{CO}} = 8314 / 32 = 259,8 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$$

Средняя кажущаяся молярная масса смеси

$$\mu_{\text{см}} = r_{\text{N}_2} \cdot \mu_{\text{N}_2} + r_{\text{CO}} \cdot \mu_{\text{CO}} = 0,79 \cdot 28 + 0,21 \cdot 32 = 28,84 \text{ кг/кмоль}$$

Массовые доли компонентов смеси

$$g_{\text{N}_2} = \mu_{\text{N}_2} \cdot r_{\text{N}_2} / \mu_{\text{см}} = 28 \cdot 0,79 / 28,84 = 0,767$$

$$g_{\text{CO}} = \mu_{\text{CO}} \cdot r_{\text{CO}} / \mu_{\text{см}} = 32 \cdot 0,21 / 28,84 = 0,233$$

Газовая постоянная смеси

$$R_{\text{см}} = \sum_1^n g_i \cdot R_i = g_{\text{N}_2} \cdot R_{\text{N}_2} + g_{\text{CO}} \cdot R_{\text{CO}} = 0,767 \cdot 296,9 + 0,233 \cdot 259,8 = 288,3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$$

или

$$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{28,84} = 288,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$$

Для первого процесса 1-2 изохорного  $V_2 = V_1 = 20 \text{ м}^3$

Давление определим из уравнения состояния

$$p_1 = \frac{M \cdot R \cdot T_1}{V_1} = \frac{25 \cdot 288,3 \cdot (80 + 273)}{20} = 127200 \text{ Па} = 1,272 \text{ бар}$$

Давление в конце процесса

$$p_2 = \frac{M \cdot R \cdot T_2}{V_2} = \frac{25 \cdot 288,3 \cdot (550 + 273)}{20} = 296600 \text{ Па} = 2,966 \text{ бар}$$

Для первого процесса 2-3 изобарного  $p_3 = p_2 = 2,966 \text{ бар}$ ,  $t_3 = t_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

Объем найдем из уравнения состояния

$$V_3 = \frac{M \cdot R \cdot T_3}{p_3} = \frac{25 \cdot 288,3 \cdot (80 + 273)}{296600} = 8,578 \text{ м}^3$$

Определим средние теплоемкости в диапазоне температур 80...550  $^\circ\text{C}$

#### Молярные теплоемкости при температурах

$$t_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C} \quad \mu_{c_{pN_2}} = 29,046 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}, \quad \mu_{c_{pCO}} = 29,489 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)},$$

$$\mu_{c_p} = r_{N_2} \cdot \mu_{c_{pN_2}} + r_{CO} \cdot \mu_{c_{pCO}} + r_{H_2} \cdot \mu_{c_{pH_2}} + r_{H_2O} \cdot \mu_{c_{pH_2O}} = 0,79 \cdot 29,046 +$$

$$+ 0,21 \cdot 29,489 = 29,139 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}$$

$$t_1 = 550 \text{ }^\circ\text{C} \quad \mu_{c_{pN_2}} = 29,908 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}, \quad \mu_{c_{pCO}} = 31,552 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)},$$

$$\mu_{c_p} = r_{N_2} \cdot \mu_{c_{pN_2}} + r_{CO} \cdot \mu_{c_{pCO}} = 0,79 \cdot 29,908 +$$

$$+ 0,21 \cdot 31,552 = 30,253 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}$$

Средние молярные теплоемкости смеси для заданного интервала температур

$$\mu_{c_p} = \frac{\mu_{c_p|300} - \mu_{c_p|1000}}{t_2 - t_1} = \frac{29,139 \cdot 80 - 30,253 \cdot 550}{80 - 550} = 28,949 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}\cdot\text{К}}$$

$$\mu_{c_v} = \mu_{c_p} - \mu R = 28,949 - 8,314 = 20,635 \text{ кДж/(кмоль}\cdot\text{К)}$$

Средние массовые теплоемкости смеси для заданного интервала температур

$$c_p = \mu_{c_p} / \mu_{см} = 28,949 / 28,84 = 1,004 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$$

$$c_v = \mu_{c_v} / \mu_{см} = 20,635 / 28,84 = 0,716 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$$

Количество теплоты для нагрева смеси в диапазоне от  $t_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$

$$q_{1-2} = M \cdot c_v \cdot (t_2 - t_1) = 25 \cdot 0,716 \cdot (550 - 80) = 8407,3 \text{ кДж}$$

Работа

$$l_{1-2} = 0$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 25 \cdot 0,716 \cdot (550 - 80) = 8407,3 \text{ кДж}$$

Изменение энтропии

$$S_{1-2} = M \cdot \left( c_v \cdot \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \right) = 25 \cdot \left( 0,716 \cdot \ln \left( \frac{550 + 273}{80 + 273} \right) \right) = 15,142 \text{ кДж/К}$$

Количество теплоты для охлаждения смеси в диапазоне от  $t_2 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_3 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$

$$q_{2-3} = M \cdot c_p \cdot (t_3 - t_2) = 25 \cdot 1,004 \cdot (80 - 550) = -11794,6 \text{ кДж}$$

Работа

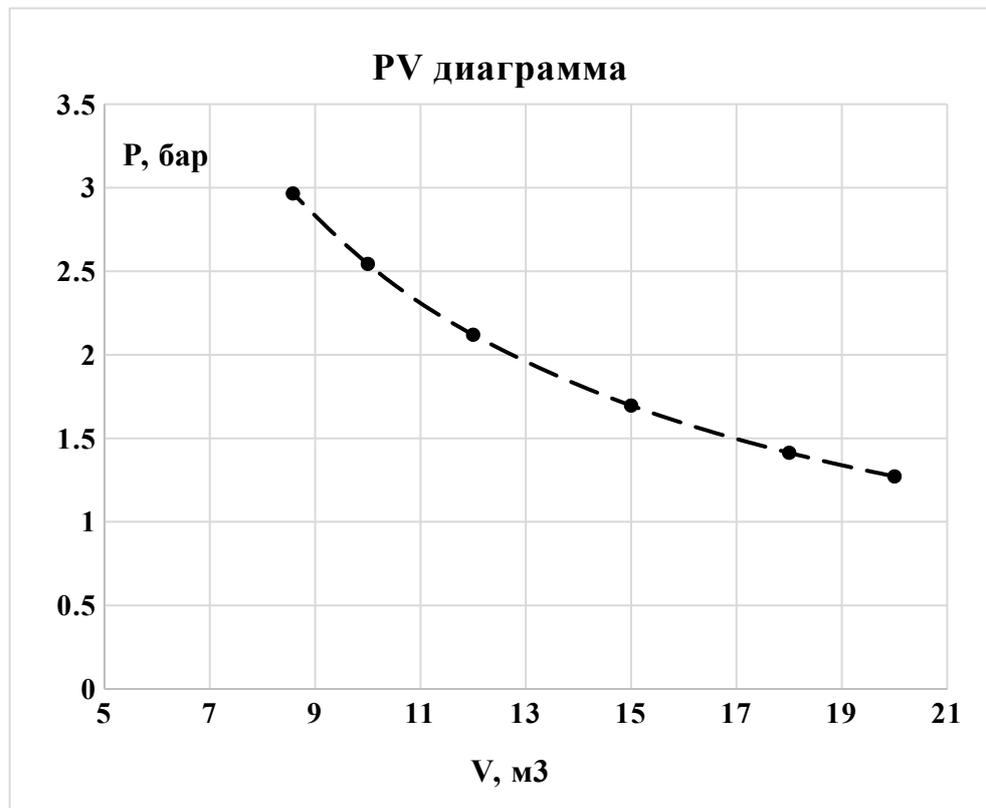
$$l_{2-3} = p_2 \cdot (V_3 - V_2) = 296,5 \cdot (8,578 - 20) = -3387,3 \text{ кДж}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U_{2-3} = M \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2) = 25 \cdot 0,716 \cdot (80 - 550) = -8407,27 \text{ кДж}$$

Изменение энтропии

$$S_{2-3} = M \cdot \left( c_p \cdot \ln \left( \frac{T_3}{T_2} \right) \right) = 25 \cdot \left( 1,004 \cdot \ln \left( \frac{80 + 273}{550 + 273} \right) \right) = -21,242 \text{ кДж/К}$$



**TS диаграмма**

