

# МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»**

**(РУТ(МИИТ))**

**Российская открытая академия транспорта (РОАТ)**

---

Кафедра: «Теплоэнергетика и водоснабжение на транспорте»

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

**По дисциплине:** «Специальные вопросы термодинамики»

**Тема:** «Расчет круговых процессов»

**Выполнил:**

Студент 4 курса

Группа: ЗТЭ – 4911

Шифр: 1910-п/ЭНб-0609

Соловьёв Д.С

**Проверил:**

Доцент, кандидат технических наук

Драбкина Елена Васильевна

Дата: \_\_\_\_\_

Подпись: \_\_\_\_\_

Москва 2023 г.

## Содержание

Задача 1.....	3
Задача 2.....	5
Задача 3.....	9
Задача 4.....	14
Задача 5.....	17

## Задача 1.

1 кг сухого воздуха в прямом обратимом цикле Карно совершает полезную работу  $l_0 = 26$  кДж/кг, максимальное абсолютное давление воздуха 10 МПа и соответствующая абсолютная температура 1200 К. В цикле к газу подводится теплота  $q_1 = 38$  кДж/кг. Минимальное давление в цикле 0,1 МПа. Определить термический КПД и основные параметры во всех переходных точках цикла. Изобразить цикл в P-V и T-S-диаграммах.

## Решение

### Точка 1

Дано:  $p_1 = 10 \text{ МПа}$ ,  $T_1 = 1200 \text{ К}$ .

Удельный объем воздуха находим из характеристического уравнения состояния:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (1)$$

$$v_1 = \frac{287 \cdot 1200}{10 \cdot 10^6} = 0,034 \text{ м}^3/\text{кг}$$

### Точка 2

Дано:  $T_2 = T_1 = 1200 \text{ К}$ .

Количество подведенной теплоты:

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1}, \text{ кДж}/\text{кг} \quad (2)$$

откуда находим удельный объем

$$v_2 = e^{\frac{q_1}{RT_1} + \ln v_1}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (3)$$

$$v_2 = 2,718^{\frac{38}{0,287 \cdot 1200} + \ln 0,034} = 0,038 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Г

Давление находим из уравнения изотермы (процесс 1-2):

$$p_2 = p_1 \frac{v_1}{v_2}, \text{МПа} \quad (4)$$

$$p_2 = 10 \frac{0,034}{0,038} = 8,95 \text{МПа}$$

### Точка 3

Дано:  $p_3 = 0,1 \text{МПа}$ ,

Удельный объем и температуру воздуха находим соотношения параметров в адиабатном процессе 2-3:

$$v_3 = v_2 \left( \frac{p_2}{p_3} \right)^{\frac{1}{\kappa}}, \text{м}^3/\text{кг} \quad (5)$$

$$v_3 = 0,038 \cdot \left( \frac{8,95}{0,1} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,942 \text{м}^3/\text{кг}$$

$$T_3 = T_2 \left( \frac{v_2}{v_3} \right)^{\kappa-1}, \text{К} \quad (6)$$

$$T_3 = 1200 \cdot \left( \frac{0,038}{0,942} \right)^{1,4-1} = 332 \text{К}$$

### Точка 4

Дано:  $T_4 = T_3 = 332 \text{К}$ ;

Давление находим из уравнения адиабаты (процесс 4-1):

$$p_4 = p_1 \left( \frac{T_4}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \text{МПа} \quad (7)$$

$$p_4 = 10 \cdot \left( \frac{332}{1200} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 0,11 \text{МПа}$$

Удельный объем находим из уравнения изотермы (процесс 3-4):

$$v_4 = v_3 \frac{p_3}{p_4}, \text{м}^3/\text{кг} \quad (8)$$

$$v_4 = 0,942 \frac{0,1}{0,11} = 0,856 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Термический коэффициент полезного действия цикла:

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} \quad (9)$$

$$\eta_t = \frac{26}{38} = 0,68$$

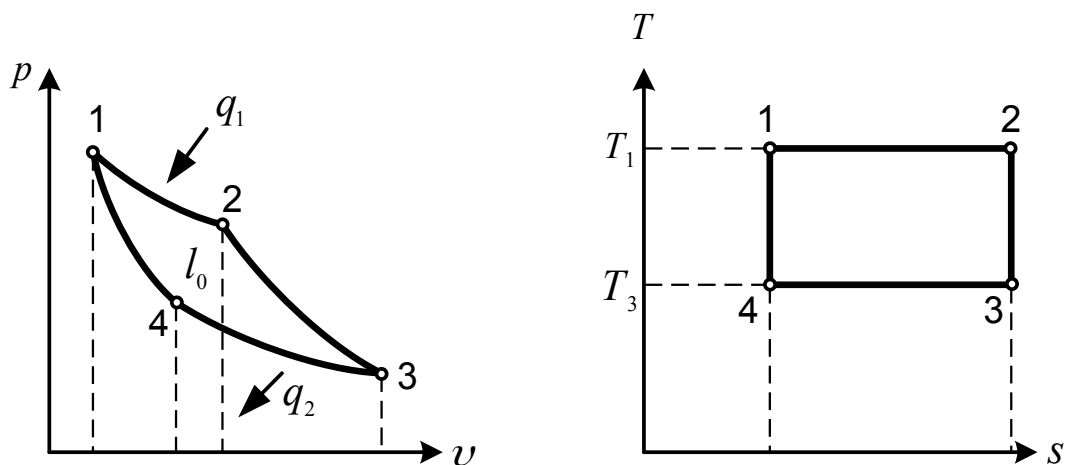


Рисунок 1 - Цикл Карно в  $p - v$  и  $T - s$  координатах.

### Задача 2.

Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом  $q_1 = 830 \text{ кДж/кг}$  теплоты при постоянном объеме определить степень сжатия, основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, полезную работу, подведенную и отведенную теплоту, если повышение давления в процессе сжатия  $\beta = 16$  и понижение температуры в процессе отвода теплоты составляет  $\Delta t = 350 \text{ К}$ . Рабочее тело (1 кг сухого воздуха) в начальной точке цикла имеет давление 0,1 МПа и температуру  $67^\circ\text{C}$ . Изобразить цикл в  $PV$  и  $TS$ -диаграммах.

### Решение

### Точка 1

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}, T_1 = 273 + 67 = 340 \text{ К}.$$

Удельный объем воздуха находим из характеристического уравнения состояния:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (1)$$

$$v_1 = \frac{287 \cdot 340}{0,1 \cdot 10^6} = 0,976 \text{ м}^3/\text{кг}$$

### Точка 2

Повышение давления в процессе сжатия

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} \quad (2)$$

откуда находим давление

$$p_2 = p_1 \cdot \beta, \text{ МПа} \quad (3)$$

$$p_2 = 0,1 \cdot 16 = 1,6 \text{ МПа}$$

Температуру в конце адиабатного сжатия определяем из соотношения:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = T_1 \beta, \text{ К} \quad (4)$$

$$T_2 = 340 \cdot 16^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 751 \text{ К} (478^\circ \text{ C})$$

Удельный объем в конце адиабатного сжатия:

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (5)$$

$$v_2 = \frac{287 \cdot 751}{1,6 \cdot 10^6} = 0,135 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Степень сжатия:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{0,976}{0,135} = 7,2$$

#### Точка 4

Удельный объем  $v_4 = v_1 = 1,070 \text{ м}^3 / \text{кг}$

Температура в конце адиабатного расширения:

$$t_4 = t_1 + \Delta t, K \quad (7)$$

$$t_4 = 67 + 380 = 447^\circ C (720K)$$

Давление в конце адиабатного расширения определяем из соотношения параметров в изохорном процессе (линия 4-1):

$$p_4 = p_1 \frac{T_4}{T_1}, \text{ МПа} \quad (8)$$

$$p_4 = 0,1 \frac{720}{340} = 0,2 \text{ МПа}$$

#### Точка 3

Удельный объем  $v_3 = v_2 = 0,135 \text{ м}^3 / \text{кг}$

Давление находим из соотношения параметров в адиабатном процессе 3-4:

$$\frac{p_4}{p_3} = \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^\kappa \quad (9)$$

откуда

$$p_3 = p_4 \left( \frac{v_4}{v_3} \right)^\kappa = p_4 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^\kappa, \text{ МПа} \quad (10)$$

$$p_3 = 0,2 \cdot \left( \frac{0,976}{0,135} \right)^{1,4} = 3,2 \text{ МПа}$$

$$T_3 = \frac{p_3 v_3}{R}, K \quad (11)$$

$$T_3 = \frac{3,2 \cdot 10^6 \cdot 0,135}{287} = 1505 K (1232^\circ C)$$

Количество подведенной теплоты:

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2), \text{кДж/кг} \quad (12)$$

где  $c_v$  -массовая теплоемкость при постоянном объеме,  $\text{кДж/кг} \cdot K$ ,

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu}, \text{кДж/кг} \cdot K \quad (13)$$

$$c_v = \frac{20,93}{28,97} = 0,723 \text{кДж/кг} \cdot K$$

Подставляя полученные значения в формулу (12), находим

$$q_1 = 0,723 \cdot (1505 - 751) = 545 \text{кДж/кг}$$

Количество отведенной теплоты:

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1), \text{кДж/кг} \quad (14)$$

$$q_2 = 0,723 \cdot (720 - 340) = 275 \text{кДж/кг}$$

Работа цикла:

$$l_u = q_1 - q_2, \text{кДж/кг} \quad (15)$$

$$l_u = 545 - 275 = 270 \text{кДж/кг}$$

Термический коэффициент полезного действия цикла:

$$\eta_t = \frac{l_w}{q_1} \quad (16)$$

$$\eta_t = \frac{270}{545} = 0,50 (50\%)$$



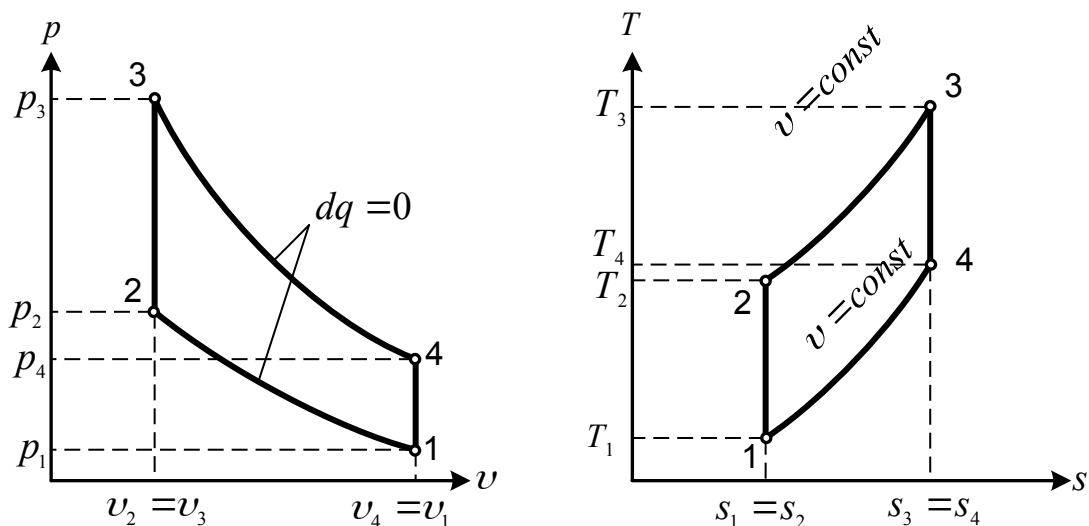


Рисунок 1 - Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $v = const$  в  $p - v$  и  $T - s$  координатах

### Задача 3.

Поршневой двигатель внутреннего сгорания работает по идеальному циклу с подводом теплоты  $q_1 = 830$  кДж/кг при постоянном давлении. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, его термический к.п.д., полезную работу, если начальное абсолютное давление 0,1 МПа, начальная температура  $80^\circ\text{C}$  и степень сжатия  $\epsilon = 16$ . Теплоемкость воздуха считать независимой от температуры. Рабочее тело 1 кг сухого воздуха. Изобразить цикл в  $PV$  и  $TS$ -диаграммах.

### Решение

#### Точка 1

Дано:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $T_1 = 273 + 80 = 353 \text{ К}$ .

Удельный объем определяем из уравнения состояния:

$$pv = RT \quad (1)$$

откуда

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2)$$

где  $R$  - газовая постоянная воздуха (справочная величина),  
 $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$$v_1 = \frac{287,0 \cdot 353}{0,1 \cdot 10^6} = 1,013 \text{ м}^3/\text{кг}$$

## Точка 2

Дано:  $\varepsilon = 16$ .

Степень сжатия:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \quad (3)$$

откуда находим удельный объем

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (4)$$

$$v_2 = \frac{1,013}{16} = 0,063 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Температура в конце адиабатного сжатия:

$$T_2 = T_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = T_1 \varepsilon^{k-1}, \text{ К} \quad (5)$$

где  $k = 1,4$  - показатель адиабаты воздуха, как двухатомного газа (справочная величина);

$$T_2 = 353 \cdot 16^{1,4-1} = 1070 \text{ К}$$

Давление в конце адиабатного сжатия:

$$p_2 = \frac{RT_2}{v_2}, \text{ МПа} \quad (6)$$

$$p_2 = \frac{287 \cdot 1070}{0,063 \cdot 10^6} = 4,87 \text{ МПа}$$

### Точка 3

Дано:  $p_3 = p_2 = 4,87 \text{ МПа}$ , так как процесс 2-3 – изобарный,  
 $q_1 = 830 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Количество подведенной теплоты:

$$q_1 = c_p (t_3 - t_2), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (7)$$

где  $c_p$  -массовая теплоемкость воздуха, как двухатомного газа, при постоянном давлении,  $\frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$ ;

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu}, \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})} \quad (8)$$

тут  $\mu c_p$  - мольная теплоемкость воздуха при постоянном давлении (справочные данные),  $\frac{\text{кДж}}{(\text{кмоль} \cdot \text{К})}$ ;

$\mu$  - молярная масса воздуха (справочные данные),  $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ ;

$$c_p = \frac{29,3}{28,96} = 1,012 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$$

из (7)

$$T_3 = \frac{q_1}{c_p} + 273 + T_2, \text{К} \quad (9)$$

$$T_3 = \frac{830}{1,012} + 273 + 1070 = 1913 \text{К}$$

Из соотношения параметров в изобарном процессе:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2} \quad (10)$$

отсюда

$$v_3 = v_2 \cdot \frac{T_3}{T_2}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (11)$$

$$v_3 = 0,063 \cdot \frac{1913}{1070} = 0,112 \text{ м}^3/\text{кг}$$

#### Точка 4

Дано:  $v_4 = v_1 = 1,013 \text{ м}^3/\text{кг}$ , так как процесс 4-1 – изохорный.

Давление в конце адиабатного расширения:

$$\frac{p_3}{p_4} = \left( \frac{v_4}{v_3} \right)^k \quad (12)$$

откуда

$$p_4 = p_3 \left( \frac{v_3}{v_4} \right)^k, \text{ МПа} \quad (13)$$

$$p_4 = 4,87 \cdot \left( \frac{0,112}{1,013} \right)^{1,4} = 0,22 \text{ МПа}$$

Температуру в конце адиабатного сжатия определяем из соотношения параметров в изохорном процессе 1-4:

$$T_4 = T_1 \frac{p_4}{p_1}, \text{ К} \quad (14)$$

$$T_4 = 353 \frac{0,22}{0,1} = 776 \text{ К}$$

Количество отведенной теплоты:

$$q_2 = q_{4-1} = c_v (T_4 - T_1), \text{ кДж}/\text{кг} \quad (15)$$

где  $c_v$  - массовая теплоемкость при постоянном объеме,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (16)$$

тут  $\mu c_v$  - мольная теплоемкость воздуха, как двухатомного газа при постоянном объеме (справочные данные),  $\frac{\text{кДж}}{(\text{кмоль} \cdot \text{К})}$ ;

$$c_v = \frac{20,97}{28,96} = 0,724 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$$

тогда по формуле (15)

$$q_2 = 0,724 \cdot (776 - 353) = 306 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Полезная работа:

$$l_u = q_1 - q_2, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad (17)$$

$$l_u = 830 - 306 = 524 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Термический к.п.д. цикла:

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} \quad (18)$$

$$\eta_t = \frac{524}{830} = 0,80 (80\%)$$

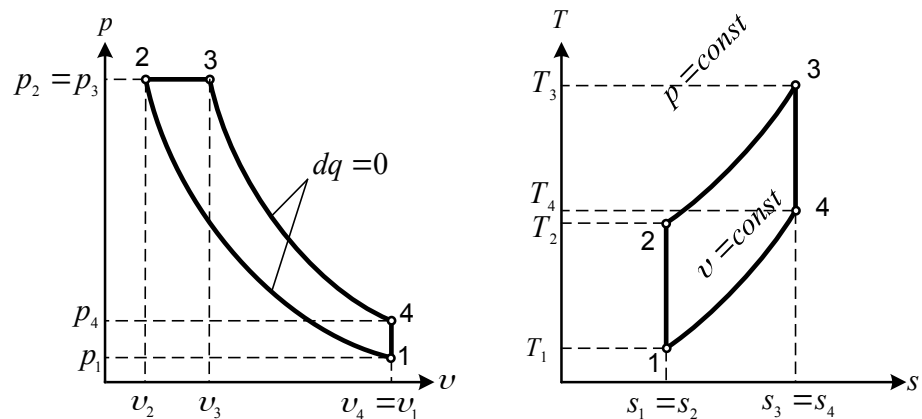


Рисунок 3 - Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при  $p = const$  в  $p - v$  и  $T - s$  координатах

#### Задача 4.

Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты, также степень сжатия, термический к.п.д и полезную работу, если заданы характеристики цикла  $\rho = 1,4$  и  $\lambda = 1,3$  В начальной точке цикла  $p_1 = 0,1$  МПа,  $t_1 = 80^\circ\text{C}$  и степень сжатия  $\varepsilon$ . Теплоемкость воздуха считать независимой от температуры. Рабочее тело 1 кг воздуха. Изобразить цикл в PV и TS-диаграммах.

#### Решение:

##### Точка 1

В точке 1 давление  $p_1 = 0,1$  МПа, температура  $T_1 = 80 + 273 = 353$  К.

Удельный объем  $v_1$  найдем по формуле

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 353}{0,1 \cdot 10^6} = 1,013 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

##### Точка 2

Степень сжатия  $\varepsilon = 16$  возьмем из предыдущей задачи. Так как  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ ,  
получаем

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,013}{14,5} = 0,064 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Из уравнения адиабаты следует, что

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \Leftrightarrow T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 353 \cdot \left( \frac{1,013}{0,064} \right)^{1,4-1} = 1065 \text{ К}$$

Находим давление в точке 2

$$p_2 = \frac{RT_2}{v_2} = \frac{287 \cdot 1065}{0,064} = 4,7 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

##### Точка 3

Степень повышения давления в изохорном процессе  $\lambda = p_3/p_2 = 1,3$ .

Тогда  $p_3 = \lambda \cdot p_2 = 1,3 \cdot 4,7 \cdot 10^6 = 6,11 \cdot 10^6$  Па

Температуру найдем по уравнению

$$T_3 = \frac{p_3 v_3}{R} = \frac{6,11 \cdot 0,064}{287} = 1362 \text{ К}$$

#### Точка 4

$$\rho = v_4 / v_3 = 1,4$$

Степень предварительного расширения ·

Отсюда удельное давление воздуха в точке 4 составит

$$v_4 = \rho \cdot v_3 = 1,4 \cdot 0,064 = 0,0896 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Так как процесс изобарный, давление в точке 4  $P_4$  будет равно давлению воздуха в точке 3.

Температуру  $T_4$  определим по уравнению

$$T_4 = \frac{p_4 v_4}{R} = \frac{6,11 \cdot 0,0896}{287} = 1907 \text{ К}$$

#### Точка 5

Так как процесс 5-1 является изохорным, удельный объем в точке 5 будет равным удельному объему в точке 1:  $v_5 = v_1 = 1,013 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

При адиабатическом расширении справедливо выражение

$$\frac{T_5}{T_4} = \left( \frac{v_4}{v_5} \right)^{k-1} \Leftrightarrow T_5 = T_4 \cdot \left( \frac{v_4}{v_5} \right)^{k-1} = 1907 \cdot \left( \frac{0,0896}{1,013} \right)^{1,4-1} = 722 \text{ К}$$

Давление в точке 5 определяем по уравнению

$$p_5 = \frac{RT_5}{v_5} = \frac{287 \cdot 722}{1,013} = 0,20 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Определим количество подведенной теплоты

$$\begin{aligned} q_1 &= c_v \cdot (T_3 - T_2) + c_p \cdot (T_4 - T_3) = \\ &= \frac{20,93}{28,96} \cdot (1362 - 1065) + \frac{29,31}{28,96} \cdot (1907 - 1362) = 766 \text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

Вычислим количество отведенной теплоты

$$q_2 = c_v \cdot (T_5 - T_1) = \frac{20,93}{28,96} \cdot (722 - 353) = 266 \text{ кДж/кг.}$$

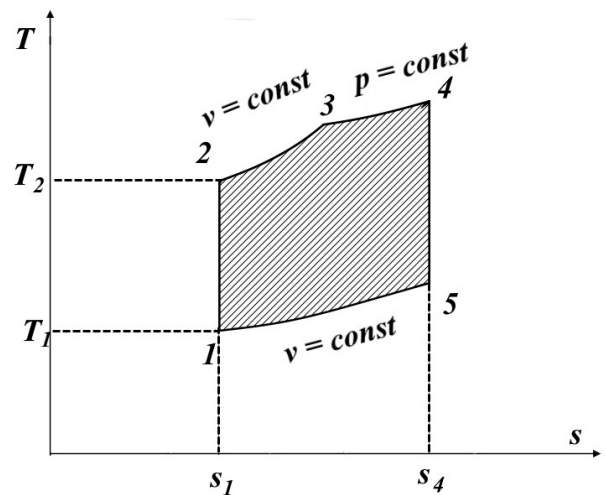
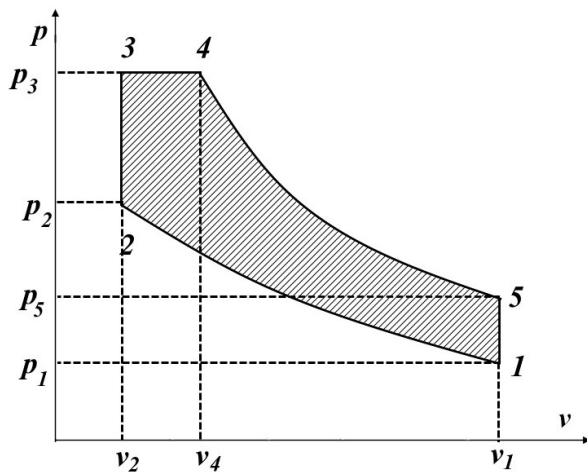
Полезная работа будет

$$l_0 = q_1 - q_2 = 766 - 266 = 500 \text{ кДж/моль.}$$

Термический к.п.д. цикла

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

$$= 1 - \frac{1}{14^{1,4-1}} \cdot \frac{1,3 \cdot 1,4^{1,4} - 1}{1,3 - 1 + 1,4 \cdot 1,3 \cdot (1,4 - 1)} = 0,6336 \text{ или } 63,36\%.$$



Цикл со смешанным подводом теплоты в PV – и TS –диаграммах.

### Задача 5

Степень повышения давления в компрессоре газотурбинной установки равна  $\lambda = 7,6$  температура рабочего тела перед соплами турбины равна  $800^\circ\text{C}$ . В идеальном цикле ГТУ теплота подводится при постоянном давлении. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический к.п.д, удельную полезную работу цикла, изменение удельной энтропии в процессе подвода теплоты, приняв теплоемкость рабочего тела независимой от температуры. Начальные параметры цикла  $p_1=0,1 \text{ МПа}$ ,  $t_1=27^\circ\text{C}$ . Изобразить цикл в PV и TS-диаграммах.



## Решение

### Точка 1

Дано:  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ ,  $T_1 = 27 + 273 = 300 \text{ К}$

Уравнение состояния для  $1 \text{ кг}$ :

$$p v = R T \quad (1)$$

где  $p$  - давление,  $\text{Па}$ ;

$v$  - удельный объем,  $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ;

$R$  - газовая постоянная рабочего тела,  $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$ ;

$T$  - температура,  $\text{К}$ ;

отсюда находим удельный объем в точке 1

$$v_1 = \frac{R T_1}{p_1}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \quad (2)$$

$$v_1 = \frac{287 \cdot 300}{0,1 \cdot 10^6} = 0,861 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

### Точка 2

Дано:  $k = 1,4$ ,  $\lambda = 7,6$

Степень увеличения давления:

$$\lambda = \frac{p_2}{p_1} \quad (3)$$

откуда находим давление в точке 2

$$p_2 = p_1 \lambda, \text{ МПа} \quad (4)$$

$$p_2 = 0,1 \cdot 7,6 = 0,76 \text{ МПа}$$

Процесс 1-2 - адиабатическое сжатие. Соотношение параметров в адиабатном процесс:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (5)$$

где  $\kappa = 1,4$  - показатель адиабаты;

тогда температура в точке 2

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = T_1 \lambda^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, K \quad (6)$$

$$T_2 = 300 \cdot 7,6^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 536K$$

Удельный объем в конце адиабатного сжатия:

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2}, M^3 / \kappa Z \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{287 \cdot 536}{0,76 \cdot 10^6} = 0,202 M^3 / \kappa Z$$

### Точка 3

Процесс 2 - 3 - изобарное расширение, тогда  $p_3 = p_2 = 0,76 \text{ МПа}$ ,  
 $T_3 = 800 + 273 = 1073K$

Соотношение параметров в изобарном процессе 2-3:

$$\frac{v_2}{v_3} = \frac{T_2}{T_3} \quad (8)$$

тогда удельный объем в точке 3

$$v_3 = v_2 \frac{T_3}{T_2}, M^3 / \kappa Z \quad (9)$$

$$v_3 = 0,202 \frac{1073}{536} = 0,404 M^3 / \kappa Z$$

### Точка 4

Дано: процесс 4 - 1 - изобарное расширение  $p_4 = p_1 = 0,1 \text{ МПа}$

Температуру в точке 4 находим из соотношения параметров в адиабатном процессе:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (10)$$

откуда

$$T_4 = T_3 \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{k-1}{k}}, K \quad (11)$$

$$T_4 = 1073 \cdot \left( \frac{0,1}{0,76} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 601 K$$

Удельный объем в точке 4 находим из соотношения параметров в изобарном процессе:

$$\frac{v_1}{v_4} = \frac{T_1}{T_4} \quad (12)$$

откуда

$$v_4 = v_1 \frac{T_4}{T_1}, M^3 / K^2 \quad (13)$$

$$v_4 = 0,861 \cdot \frac{601}{300} = 1,725 M^3 / K^2$$

Подведенная теплота в изобарном процессе 2 - 3:

$$q_1 = q_{2-3} = c_p (T_3 - T_2), KДж / K^2 \quad (14)$$

где  $c_p$  -массовая теплоемкость при постоянном давлении,  
 $KДж / (K^2 \cdot K)$ ;

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu}, KДж / (K^2 \cdot K) \quad (15)$$

$$c_p = \frac{29,3}{28,96} = 1,012 KДж / (K^2 \cdot K)$$

тогда

$$q_1 = 1,012 \cdot (1073 - 536) = 543 KДж / K^2$$

Отведенная теплота в изохорном процессе 4 - 1:

$$q_2 = q_{4-1} = c_v (T_1 - T_4), \text{кДж/кг} \quad (16)$$

где  $c_v$  -массовая теплоемкость при постоянном объеме,  $\text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ ;

$$c_v = \frac{c_p}{k}, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)} \quad (17)$$

$$c_v = \frac{1,012}{1,4} = 0,723 \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$

тогда

$$q_2 = 0,724 \cdot (601 - 300) = 218 \text{кДж/кг}$$

Удельная полезная работа цикла:

$$l_u = q_1 - q_2, \text{кДж/кг} \quad (18)$$

$$l_u = 543 - 218 = 325 \text{кДж/кг}$$

Термический КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (19)$$

$$\eta_t = \frac{543 - 218}{543} = 0,60 (60\%)$$

Изменение удельной энтропии в процессе подвода теплоты (изобарный процесс 2-3):

$$\Delta s_{2-3} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2}, \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)} \quad (20)$$

$$\Delta s_{2-3} = 1,012 \ln \frac{1073}{536} = 0,702 \text{кДж/(кг} \cdot \text{K)}$$

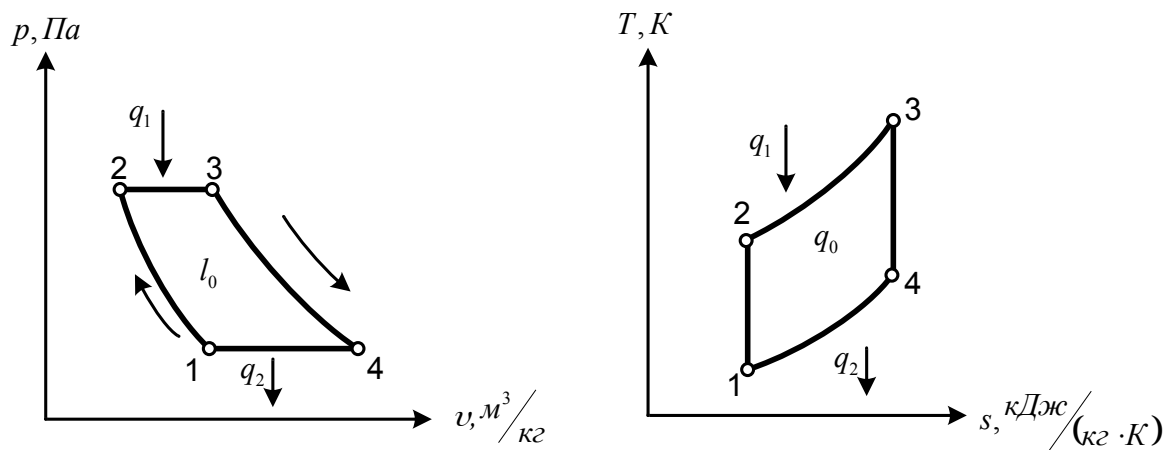


Рисунок 5 - Цикл ГТУ с подводом теплоты при  $p = const$  в  $p - v$  и  $T - s$  диаграммах.