

**Задача 1.** Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объёме (цикл Отто) определить степень сжатия  $\varepsilon$ , основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД  $\eta_p$ , полезную работу  $l$ , подведённую  $q_1$  и отведённую теплоту  $q_2$ , если повышение давления в процессе сжатия  $\beta = 11$  и понижение температуры в процессе отвода теплоты составляет  $\Delta T = 290$ . Рабочее тело (сухой воздух) в начальной точке цикла имеет давление  $0,1$  МПа и температуру  $57^\circ\text{C}$ . Изобразить цикл в  $p-v$  и  $T-s$ -координатах.

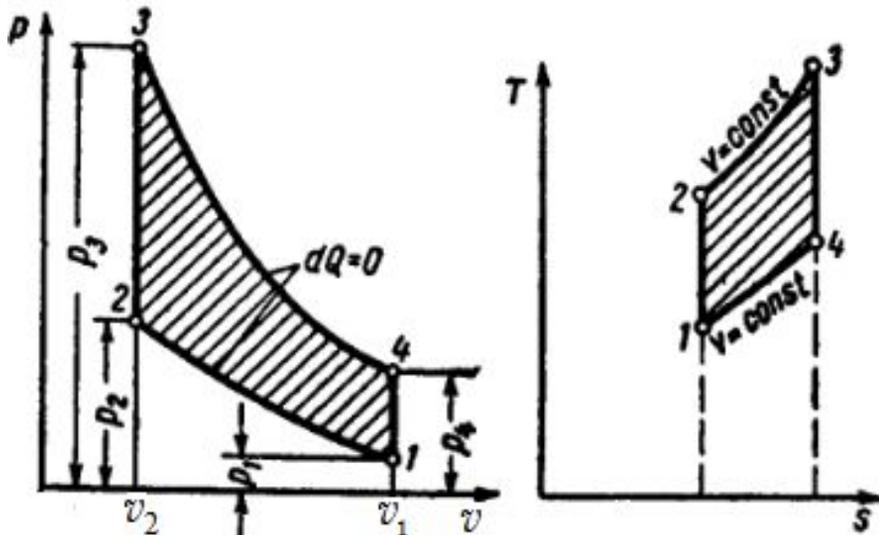
### Решение

Процесс 1-2 является адиабатным, поэтому для определения степени сжатия воспользуемся уравнением Пуассона

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$$

Выразим отсюда степень сжатия

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}$$



Учитывая, что  $\beta = p_2/p_1$  получаем

$$\varepsilon = \beta^{\frac{1}{k}}$$

Подставим числовые значения

$$\varepsilon = 11^{\frac{1}{1,4}} = 5,5$$

Удельный объём воздуха  $v_1$  в состоянии 1 определим из уравнения состояния

$$p_1 v_1 = RT_1 \quad v_1 = \frac{RT_1}{p_1}$$

Газовую постоянную для воздуха найдём из [таблицы](#)  $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Подставим числовые значения

$$v_1 = \frac{287 \cdot 330}{10^5} = 0,95 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Давление после сжатия определим по формуле

$$p_2 = \beta p_1 \quad p_2 = 11 \cdot 10^5 = 1,1 \text{ МПа}$$

Определим температуру в 4 состоянии из равенства

$$\Delta T = T_4 - T_1 \quad T_4 = T_1 + \Delta T \quad T_4 = 330 + 290 = 620$$

**Молекулярные массы, плотности, молярные объёмы при нормальных условиях и газовые постоянные  
важнейших газов**

1  
2  
3

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса $\mu$ , кг/кмоль	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Молярный объём $v_{\mu}$ , м <sup>3</sup> /кмоль	Газовая постоянная $R$ , Дж/(кг·К)
Воздух	—	28,96	1,293	22,40	287,0
Кислород	O <sub>2</sub>	32,00	1,439	22,39	259,8
Азот	N <sub>2</sub>	28,026	1,251	22,40	296,8
Атмосферный азот	N <sub>2</sub>	28,16	1,257	22,40	295,3
Гелий	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	0,090	22,43	4124,0
Окись углерода	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH <sub>4</sub>	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	—	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,016	0,804	22,40	461

Давление воздуха  $p_4$  в состоянии 4 определим из уравнения состояния

$$p_4 v_1 = RT_4 \quad p_4 = \frac{RT_4}{v_1}$$

Подставим числовые значения

$$p_4 = \frac{287 \cdot 620}{0,95} = 1,9 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1,9 \text{ МПа}$$

Удельный объём в состоянии 2 определим из равенства

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \quad v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} \quad v_2 = \frac{0,95}{5,5} = 0,17 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Температуру воздуха в состоянии 2 определим из равенства

$$p_2 v_2 = RT_2 \quad T_2 = \frac{p_2 v_2}{R}$$

Подставим числовые значения

$$T_2 = \frac{1,1 \cdot 10^6 \cdot 0,17}{287} = 652$$

Давление в состоянии 3 определим из уравнения для адиабатного процесса 3-4

$$p_3 v_3^k = p_4 v_4^k$$

Выразим отсюда давление

$$p_3 = p_4 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_4 \varepsilon^k = p_4 \left( \beta^{\frac{1}{k}} \right)^k = p_4 \beta$$

$$p_3 = 1,1 \cdot 10^5,09 \text{ МПа}, 09 \cdot 10^6 =$$

Температуру воздуха в состоянии 3 определим из равенства

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} \quad T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2}$$

Подставим числовые значения

$$T_3 = 352 \cdot \frac{2,09 \cdot 10^6}{1,1 \cdot 10^6} = 1239$$

Определим удельное количество теплоты полученное воздухом

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2)$$

Удельную теплоёмкость при постоянном объёме найдём по равенству

$$c_v = \frac{R}{k-1}$$

Тогда выражение для удельного количества теплоты будет иметь вид

$$q_1 = \frac{R(T_3 - T_2)}{k - 1}$$

Подставим числовые значения

$$q_1 = \frac{287 \cdot (1239 - 652)}{1,4 - 1} = 421 \text{ Дж/кг}$$

Определим удельное количество теплоты отданное воздухом

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1) = \frac{R\Delta T}{k - 1}$$

Подставим числовые значения

$$q_2 = \frac{287 \cdot 290}{1,4 - 1} = 208 \text{ Дж/кг}$$

Удельную работу определим по формуле

$$l = q_1 - q_2$$

Вычислим работу

$$l = 421 - 208 = 213$$

Определим термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} \cdot 100\%$$

Подставим числовые значения

$$\eta_t = \frac{213}{421} \cdot 100\% = 51\%$$

Определим удельную энтропию воздуха в переходных точках цикла. В состоянии 1 энтропию определим по формуле

$$s_1 = c_p \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - R \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) = \frac{kR}{k-1} \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) \quad p_1 = p_0 = 0,1 \text{ Па} \quad T_0 = 273$$

Подставим числовые значения

$$s_1 = \frac{1,4 \cdot 287}{1,4 - 1} \cdot \ln\left(\frac{330}{273}\right) \text{ Дж/(кг К)} \approx 190$$

Поскольку процесс 1-2 является адиабатным, то можно записать

$$s_2 = s_1 = 190 \text{ Дж/(кг К)}$$

Изменение удельной энтропии в изохорном процессе 2-3 и, соответственно, удельную энтропию в состоянии 3 найдём по формулам

$$\Delta s_{23} = c_v \ln \left( \frac{T_3}{T_2} \right) = \frac{R}{k-1} \ln \left( \frac{T_3}{T_2} \right) \quad s_3 = s_2 + \Delta s_{23} = s_2 + \frac{R}{k-1} \ln \left( \frac{T_3}{T_2} \right)$$

Подставим числовые значения

$$s_3 = \frac{287}{1,4-1} \ln \left( \frac{1239}{652} \right) = 651 \text{ Дж/(кг·К)} \cdot$$

Процесс 3-4 является адиабатным, поэтому можно записать

$$s_4 = s_3 = 651 \text{ Дж/(кг·К)} \cdot$$

Определим удельную энтальпию воздуха в переходных точках цикла. В состоянии 1 энтропию определим по формуле

$$h_1 = c_p t_1 \quad c_p = \frac{kR}{k-1} \quad h_1 = \frac{kRt_1}{k-1}$$

Подставим числовые значения

$$h_1 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 57}{1,4-1} = 57 \text{ Дж/кг}$$

Удельную энтальпию в состоянии 2 найдём по выражению

$$h_2 = c_p t_2 = \frac{kRt_2}{k-1}$$

$$h_2 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 379}{1,4 - 1} = 381 \text{ Дж/кг}$$

Удельную энтальпию в состояниях 3 и 4 найдём по равенствам

$$h_3 = c_p t_3 = \frac{kRt_3}{k-1}$$

$$h_4 = c_p t_4 = \frac{kRt_4}{k-1}$$

Подставим числовые значения

$$h_3 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 966}{1,4 - 1} = 970 \text{ Дж/кг}$$

$$h_4 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 347}{1,4 - 1} = 349 \text{ Дж/кг}$$

**Задача 2.** Поршневой двигатель внутреннего сгорания работает по идеальному циклу с подводом теплоты  $q_1 = 970$  кДж/кг при постоянном давлении (цикл Дизеля). Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, его термический КПД  $\eta_t$  и полезную работу  $l$ , если начальное абсолютное давление  $p_1 = 0,1$  МПа, начальная температура  $t_1 = 77^\circ\text{C}$  и степень сжатия  $\varepsilon = 19$ . Теплоёмкость воздуха считать независимой от температуры. Рабочее тело – сухой воздух. Изобразить цикл в  $p-v$  и  $Ts$ -координатах.

### Решение

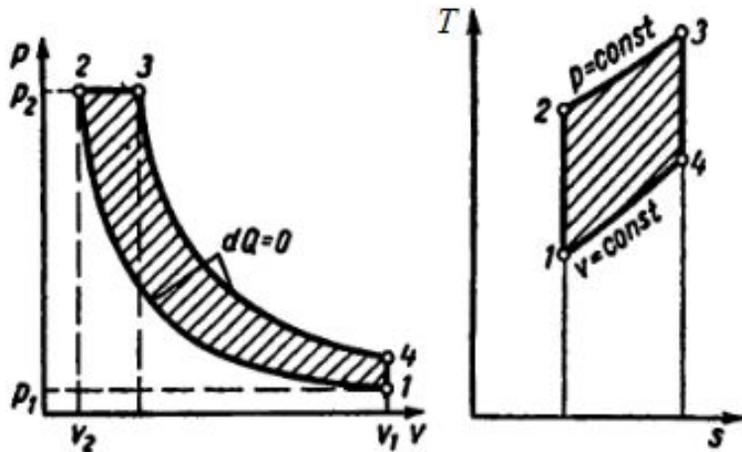
В состоянии 1 определим удельный объём воздуха воспользовавшись уравнением состояния

$$p_1 v_1 = RT_1 \quad v_1 = \frac{RT_1}{p_1}$$

Газовую постоянную для воздуха найдём из [таблицы](#)  $R = 287$  Дж/(кг · К) ·

Подставим числовые значения

$$v_1 = \frac{287 \cdot 350}{10^5} = 1,005 \text{ м}^3$$



Удельный объём в состоянии 2 определим из отношения

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad v_2 = \frac{V_1}{\varepsilon} \quad v_2 = \frac{1,005}{19} = 0,053 \text{ м}^3$$

Давление в этом состоянии определим из уравнения Пуассона для адиабаты

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \quad p_2 = p_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^k$$

Подставим числовые значения  $p_2 = 10^5 \cdot 19^{1,4} = 1,17 \cdot 10^6 \text{ Па} =$

Для определения температуры в состоянии 2 воспользуемся уравнением Пуассона для адиабатного процесса в следующем виде

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

Подставим числовые значения

$$T_2 = 350 \cdot 19^{1,4-1} = 1137$$

Для определения температуры в конце изобарного подвода удельной теплоты воспользуемся формулой для этой величины

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) \quad T_3 = T_2 + \frac{q_1}{c_p}$$

Удельную теплоёмкость при постоянном давлении найдём по выражению

$$c_p = \frac{kR}{k-1} \quad T_3 = T_2 + \frac{q_1(k-1)}{kR}$$

Вычислим температуру в состоянии 3

$$T_3 = 1137 + \frac{9,7 \cdot 10^5 \cdot (1,4 - 1)}{1,4 \cdot 287} = 2103 \text{ К}$$

Для определения удельного объёма в конце изобарного процесса запишем формулу для этого процесса

$$\frac{v_2}{T_2} = \frac{v_3}{T_3} \quad v_3 = v_2 \frac{T_3}{T_2} \quad v_3 = 0,053 \cdot \frac{2103}{1137} = 0,098 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Для определения давления в состоянии 4 запишем формулу для адиабатного процесса 3-4

$$p_2 v_3^k = p_4 v_1^k \quad p_4 = p_2 \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^k$$

Подставим числовые значения

$$p_4 = 6,17 \cdot 10^6 \cdot \left( \frac{0,098}{1,005} \right)^{1,4} = 2,4 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,24 \text{ МПа}$$

Для определения температуры в состоянии 4 запишем уравнение для изохорного процесса 4-1

$$\frac{p_4}{T_4} = \frac{p_1}{T_1} \quad T_4 = T_1 \frac{p_4}{p_1}$$

Подставим числовые значения

$$T_4 = 350 \cdot \frac{2,4 \cdot 10^5}{10^5} = 840 \text{ К}$$

Удельную работу цикла можно найти по формуле

$$l = q_1 - q_2$$

Удельное количество теплоты, которое отдаёт рабочее тело в процессе 4-1 равно

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1) \quad c_v = \frac{R}{k - 1} \quad l = q_1 - \frac{R(T_4 - T_1)}{k - 1}$$

$$l = 970000 - \frac{287 \cdot (840 - 350)}{1,4 - 1} = 618000 \text{ Дж/кг} = 618 \text{ кДж/кг}$$

Термический КПД цикла определим по формуле

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} \cdot 100\% \quad \eta_t = \frac{618000}{970000} \cdot 100\% = 64\%$$

Определим удельную энтропию воздуха в переходных точках цикла. В состоянии 1 энтропию определим по формуле

$$s_1 = c_p \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - R \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) = \frac{kR}{k-1} \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) \quad p_1 = p_0 = 0,1 \text{ Па} \quad T_0 = 273$$

Подставим числовые значения

$$s_1 = \frac{1,4 \cdot 287}{1,4 - 1} \cdot \ln\left(\frac{350}{273}\right) = 250 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Удельную энтальпию в состоянии 1 найдём по формуле

$$h_1 = c_p t_1 = \frac{kRt_1}{k-1}$$

Подставим числовые значения

$$h_1 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 77}{1,4 - 1} = 77 \text{ кДж}/\text{кг}$$

Удельные энтропию и энтальпию воздуха в состоянии 2 энтропию определим по формулам

$$s_2 = s_1 = 250 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad h_2 = \frac{kR}{k-1} t_2 \quad h_2 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 864}{1,4 - 1} = 868 \text{ кДж}/\text{кг}$$

В состоянии 3 эти величины определяются следующими выражениями

$$s_3 = s_2 + \Delta s_{23} = s_2 + c_p \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) = s_2 + \frac{kR}{k-1} \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) \quad h_3 = \frac{kR}{k-1} t_3$$

Подставим числовые значения

$$s_3 = 250 + \frac{1,4 \cdot 287}{1,4-1} \cdot \ln\left(\frac{2103}{1137}\right) = 868 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$h_3 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 1830}{1,4-1} = 1838 \text{ кДж}/\text{кг}$$

В состоянии 4 эти величины определяются следующими выражениями

$$s_4 = s_3 = 868 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$h_4 = \frac{kR}{k-1} t_4$$

$$h_4 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 567}{1,4-1} = 570 \text{ кДж}/\text{кг}$$

**Задача 3.** Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты, а также степень сжатия  $\varepsilon$ , термический КПД  $\eta_t$  и полезную работу  $l$ , если заданы характеристики цикла: степень повышения давления при изохорном подводе теплоты  $\lambda = 2,3$  и степень предварительного расширения  $\rho = 1,15$ . В начальной точке цикла  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 77^\circ\text{C}$ . Температура в конце адиабатного процесса сжатия рабочего тела равна  $650^\circ\text{C}$ . Рабочее тело – воздух. Изобразить цикл в  $p-v$  и  $Ts$ -координатах.

### Решение

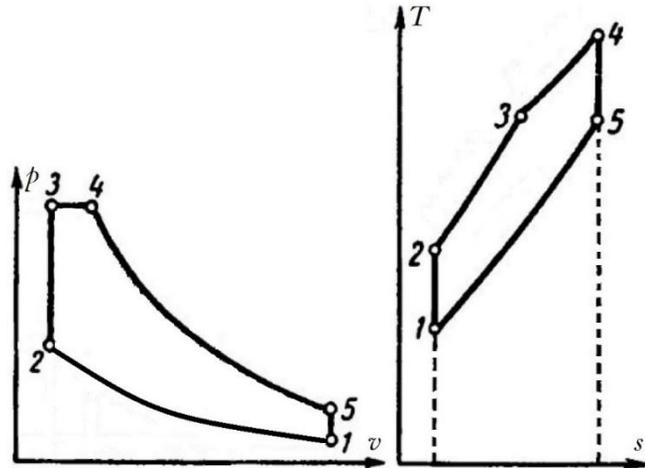
В состоянии 1 определим удельный объём воздуха воспользовавшись уравнением состояния

$$p_1 v_1 = RT_1 \quad v_1 = \frac{RT_1}{p_1}$$

Газовую постоянную для воздуха найдём из [таблицы](#)  $R = 287$  (кг К) ·

Подставим числовые значения

$$v_1 = \frac{287 \cdot 350}{10^5} = 1,005 \text{ м}^3$$



Для определения удельного объёма в состоянии 2 воспользуемся уравнением Пуассона для адиабатного процесса в следующем виде

$$T_1 v_1^{k-1} = T_2 v_2^{k-1} \quad v_2 = v_1 \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

Определим числовое значение удельного объёма

$$v_2 = 1,005 \cdot \left( \frac{350}{923} \right)^{\frac{1}{1,4-1}} = 0,089 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Определим степень сжатия воздуха в процессе 1-2

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \varepsilon = \left( \frac{923}{350} \right)^{\frac{1}{1,4-1}} = 11,3$$

Давление в состоянии 2 определим из уравнения состояния

$$p_2 v_2 = RT_2 \quad p_2 = \frac{RT_2}{v_2} \quad p_2 = \frac{287 \cdot 923}{0,089} = 2,98 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Давление в состоянии 3 определим из соотношения

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2} \quad p_3 = \lambda p_2 \quad p_3 = 2,98 \cdot 2,29 = 6,85 \text{ МПа}$$

Температуру в состоянии 3 определим из уравнения изохорного процесса

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} \quad T_3 = T_2 \frac{p_3}{p_2} = \lambda T_2 \quad T_3 = \mathbb{K} 3 \cdot 923 = 2123$$

Значение удельного объёма в состоянии 4 определим из соотношения

$$\rho = \frac{v_4}{v_2} \quad v_4 = \rho v_2 \quad v_4 = \mathbb{M} 15 \cdot 0,089 = 0,102 \quad ^3$$

Температуру в состоянии 4 определим из уравнения изобарного процесса

$$\frac{v_2}{T_3} = \frac{v_4}{T_4} \quad T_4 = T_3 \frac{v_4}{v_2} = \rho T_3 \quad T_4 = \mathbb{K} 15 \cdot 2123 = 2441$$

Чтобы определить давление в состоянии 5 запишем уравнения для адиабатного процесса 4-5

$$p_3 v_4^k = p_5 v_1^k \quad p_5 = p_3 \left( \frac{v_4}{v_1} \right)^k$$

Подставим числовые значения

$$p_5 = \mathbb{M} 15 \cdot \left( \frac{0,102}{1,005} \right)^{1,4} = 2,78 \cdot 10^5 \quad =$$

Температуру в состоянии 5 определим из уравнения состояния

$$\rho_5 v_1 = RT_5 \quad T_5 = \frac{\rho_5 v_1}{R}$$

Найдём численное значение температуры

$$T_5 = \frac{2,78 \cdot 10^5 \cdot 1,005}{287} = 973$$

Определим удельную энтропию воздуха в состоянии 1 по формуле

$$s_1 = c_p \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - R \ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right) = \frac{kR}{k-1} \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) \quad p_1 = p_0 = 0,1 \text{ Па} \quad T_0 = 273$$

Подставим числовые значения

$$s_1 = \frac{1,4 \cdot 287}{1,4-1} \cdot \ln\left(\frac{350}{273}\right) = 250 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Удельную энтальпию в состоянии 1 найдём по формуле

$$h_1 = c_p t_1 = \frac{kRt_1}{k-1}$$

Подставим числовые значения

$$h_1 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 77}{1,4-1} = 77 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Удельные энтропию и энтальпию воздуха в состоянии 2 энтропию определим по формулам

$$s_2 = s_1 = 250 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad h_2 = \frac{kR}{k-1} t_2 \quad h_2 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 650}{1,4-1} = 653 \text{ Дж}/\text{кг}$$

В состоянии 3 эти величины определяются следующими выражениями

$$s_3 = s_2 + \Delta s_{23} = s_2 + c_v \ln \left( \frac{T_3}{T_2} \right) = s_2 + \frac{R}{k-1} \ln \left( \frac{T_3}{T_2} \right) \quad h_3 = \frac{kR}{k-1} t_3$$

Подставим числовые значения

$$s_3 = 250 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot \ln \left( \frac{2123}{923} \right) = 848$$

$$h_3 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 1850}{1,4-1} = 1858 \text{ Дж}/\text{кг}$$

В состоянии 4 эти величины определяются следующими выражениями

$$s_4 = s_3 + \Delta s_{34} = s_3 + c_p \ln \left( \frac{T_4}{T_3} \right) = s_3 + \frac{kR}{k-1} \ln \left( \frac{T_4}{T_3} \right)$$

$$h_4 = \frac{kR}{k-1} t_4$$

Подставим числовые результаты для этих величин

$$s_4 = \frac{1,4 \cdot 287}{1,4 - 1} \cdot \ln \left( \frac{2441}{2123} \right) = 988 \quad .$$

$$h_4 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 2168}{1,4 - 1} = 2178 \text{ Дж/кг}$$

Теперь определим эти величины в состоянии 5

$$s_5 = s_4 = 988 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} \quad . \quad h_5 = \frac{kR}{k-1} t_5$$

Подставим числовые значения

$$h_5 = \frac{1,4 \cdot 287 \cdot 700}{1,4 - 1} = 703 \text{ Дж/кг}$$

Удельную работу рабочего тела за цикл определим по формуле

$$l = q_1 - q_2$$

Удельная теплота, подведённая к рабочему телу за цикл, определяется равенством

$$q_1 = c_v T_1 \varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + \lambda k (\rho - 1)] = \frac{RT_1 \varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + \lambda k (\rho - 1)]}{k - 1}$$

Удельная теплота, отведённая от воздуха за цикл, определяется выражением

$$q_2 = c_v T_1 (\lambda \rho^k - 1) = \frac{RT_1 (\lambda \rho^k - 1)}{k - 1}$$

Тогда удельная работа будет равна

$$\begin{aligned} l &= \frac{RT_1 \varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + \lambda k (\rho - 1)]}{k - 1} - \frac{RT_1 (\lambda \rho^k - 1)}{k - 1} = \\ &= \frac{RT_1}{k - 1} [\varepsilon^{k-1} [\lambda - 1 + \lambda k (\rho - 1)] - (\lambda \rho^k - 1)] \end{aligned}$$

Подставим числовые значения

$$\begin{aligned} l &= \frac{287 \cdot 350}{1,4 - 1} \cdot [11,3^{1,4-1} \cdot [2,3 - 1 + 2,3 \cdot 1,4 \cdot (1,15 - 1)] - (2,3 \cdot 1,15^{1,4} - 1)] = \\ &= 730 \text{ Дж/кг} \end{aligned}$$

Термический КПД цикла определим по формуле

$$\eta_t = \left[ 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k \lambda (\rho - 1)} \right] \cdot 100\%$$

Подставим числовые значения

$$\eta_t = \left[ 1 - \frac{1}{11,3^{1,4-1}} \cdot \frac{2,3 \cdot 1,15^{1,4} - 1}{2,3 - 1 + 1,4 \cdot 2,3 \cdot (1,15 - 1)} \right] \cdot 100\% = 62\%$$