

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

---

Кафедра «Технология производства авиационных двигателей»

## **КУРСОВАЯ РАБОТА**

по дисциплине: «Термодинамика и теплопередача»  
на тему:  
«Расчёт и анализ термодинамического цикла»

Студент:

Группа:  
023

14ДЛА-ЗДБ-

Преподаватель:

Бабин С.В.

Ступино 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы .....	3
2. Задание .....	3
3. Подготовка к выполнению .....	4
4. Расчёт параметров узловых точек .....	7
4.1. Точка 1 .....	7
4.2. Точка 2 .....	7
4.3. Точка 3 .....	8
4.4. Точка 4 .....	9
5. Определение параметров газа для процессов .....	10
6. Определение величин характеризующих цикл в целом .....	12
7. Расчёты $P$ , $V$ и $T$ , $S$ в промежуточных точках и их диаграммы .....	13
Список использованной литературы .....	17

## 1. Цель работы

Выполнения расчетов и анализа термодинамических циклов тепловых машин.

## 2. Задание

По исходным данным требуется определить:

1. Параметры состояния рабочего тела (воздуха): давление  $P$ , удельный объём  $V$ , температуру  $T$  и энтропию  $S$  во всех четырех узловых точках 1,2,3 и 4 цикла.

2. Параметры состояния воздуха ( $P, V, T, S$ ) в 2-3-х промежуточных точках для каждого из 4-х процессов цикла.

3. Показатель политропы  $n$ , теплоёмкость  $c_n$ , работу расширения (сжатия)  $l$ , количество подведенной (отведенной) теплоты  $q$ , изменение внутренней энергии  $\Delta U$ , изменение энтальпии  $\Delta i$  воздуха, коэффициент  $\psi$  распределения тепла между внутренней энергией и совершаемой воздухом работой.

4. Работу  $l_u$  воздуха за цикл, количество теплоты  $q_{подв}$ , подведенной к воздуху извне за цикл, и теплоты  $q_{отв}$ , отведенной от воздуха в охладитель за цикла, количество теплоты  $q_u$ , превращенной в работу, изменения внутренней энергии  $\Delta U_u$ , энтальпии  $\Delta i_u$  и энтропии  $\Delta S_u$  воздуха за цикл, термический КПД  $\eta_t$  рассчитываемого цикла и термический КПД  $\eta_{тк}$ .

### 3. Подготовка к выполнению

Уравнение состояния идеального газа:

$$PV = RT$$

Уравнение политропного процесса:

$$PV^n = \text{const}$$

где  $n$  – показатель политропы, показывает, как изменяются параметры газа в процессе.

$n=0$  изобарный процесс,

$n=\infty$  изохорный процесс,

$n=1$  изотермический процесс,

$n=k$  адиабатный процесс.

Связь между параметрами в политропном процессе в общем виде:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^n ; \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{(n-1)} = \frac{T_1}{T_2} ; \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\left( \frac{n-1}{n} \right)} = \frac{T_1}{T_2}$$

Для четырех частных случаев политропного процесса существуют следующие соотношения:

для изохорного:  $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$

для изобарного:  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$

для изотермического:  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1}$

для адиабатного:  $\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^k ; \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1} = \frac{T_1}{T_2} ; \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\left( \frac{k-1}{k} \right)} = \frac{T_1}{T_2}.$

где  $k$  – показатель адиабаты:  $k = 1 + \frac{R}{C_v} = \frac{C_p}{C_v}$

Если в задании не указан показатель политропы, то его необходимо вычислить:

$$n = \frac{\lg P_1 / P_2}{\lg V_2 / V_1}; \quad n-1 = \frac{\lg T_2 / T_1}{\lg V_1 / V_2}; \quad \frac{n-1}{n} = \frac{\lg T_2 / T_1}{\lg P_2 / P_1}$$

Уравнение Майера:

$$C_p = C_v + R$$

$C_v$  – теплоемкость газа при постоянном объеме

$C_p$  – теплоемкость газа при постоянном давлении

Уравнение первого закона термодинамики:

$$q = \Delta U + l$$

где  $\Delta U = U_2 - U_1 = C_v(T_2 - T_1)$  – изменение внутренней энергии газа

Работа расширения (сжатия) газа во всех процессах, кроме изотермического, может быть определена по формуле:

$$l = \frac{R}{1-n} (T_2 - T_1)$$

Для изотермического процесса подходит формула:

$$l = RT \ln \frac{V_2}{V_1} = RT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

В изохорном процессе нет изменения объема, поэтому  $l=0$ .

В адиабатном процессе можно использовать формулу:

$$l = -\Delta U = C_v(T_2 - T_1)$$

Изменение энтальпии газа для всех процессов идеального газа:

$$\Delta i = i_2 - i_1 = C_p(T_2 - T_1)$$

Тепло подведенное (отведенное) по формуле первого закона или:

$$q = C_n(T_2 - T_1)$$

Для четырех частных случаев политропного процесса можно использовать следующие соотношения:

В адиабатном процессе:  $q=0$

В изохорном процессе:  $q=\Delta U=C_v(T_2 - T_1)$

В изобарном процессе:  $q=\Delta i$

В изотермическом процессе:  $q=l$

Теплоемкость газа для каждого процесса рассчитывается по формулам:

$$C_n = C_v + \frac{R}{1-n} \quad C_n = C_v \frac{k-n}{1-n}$$

В изохорном процессе:  $C_n=C_v$

В изобарном процессе:  $C_n=C_p$

В изотермическом процессе:  $C_n=\infty$

В адиабатном процессе:  $C_n=0$

Аналитическое выражение второго закона термодинамики:

$$dS = \frac{dq}{T}$$

или:

$$\Delta S = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}; \quad \Delta S = C_p \ln \frac{V_2}{V_1} + C_v \ln \frac{P_2}{P_1};$$

$$\Delta S = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad \Delta S = C_n \ln \frac{T_2}{T_1}$$

## 4. Расчёт параметров узловых точек

### 4.1. Точка 1

Удельный объём:

$$V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = 0.827 \quad \text{м}^3 / \text{кг}$$

где  $P_1 = 10^5 \text{ Па}$

$$T_1 = 288 \text{ К}$$

$$R = 287 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]}$$

Энтропия:

$$S_1 = C_p \ln \left( \frac{T_1}{T_0} \right) + R \ln \left( \frac{P_1}{P_0} \right) = 714.277 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$$

где  $P_0 = 10^5 \text{ Па}$  – атмосферное давление

$T_0 = 273 \text{ К}$  – температура при нормальных условиях

$$C_p = C_v + R = 999 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]}$$

$$C_v = 712 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

### 4.2. Точка 2

Так как  $n_{2-3} = 0$ , то процесс изобарный ( $p = \text{const}$ ), следовательно  $p_2 = p_3 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Для нахождения остальных параметров в точке 2 рассмотрим процесс 1-2, т.к. параметры в точке 1 известны. Процесс 1-2 политропный  $n = 1.6$ . Из уравнения политропного процесса по известным величинам  $p_2, p_1, T_1$  найдем  $T_2$ .

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 288 \left( \frac{6 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^5} \right)^{0.375} = 563.896 \text{ К}$$

Удельный объём:

$$V_2 = \frac{V_1}{4} = 0.207 \quad \text{м}^3 / \text{кг}$$

Энтропия:

$$S_2 = S_1 + C_p \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right) = 871,28 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$$

#### 4.3. Точка 3

$$P_3 = P_2 = 6 \times 10^5 \text{ Па}$$

Показатель адиабаты:

$$k = 1 + \frac{R}{C_v} = 1.403$$

Температура:

$$T_3 := \frac{q}{C_n} + T_2 = 1.863 \times 10^3 \text{ К}$$

Где :

$$C_n = C_v \frac{k - n}{1 - n} = 999 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$q = 1298 \text{ кДж/кг}$$

Удельный объем:

$$V_3 = \frac{R \cdot T_3}{P_3} = 0,891 \quad \text{м}^3 / \text{кг}$$

Энтропия:

$$S_3 = S_2 + C_n \ln \left( \frac{T_3}{T_2} \right) = 2065 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$$



#### 4.4. Точка 4

Так как  $n_{4-1}=0$ , то процесс изобарный ( $p=\text{const}$ ) следовательно,  $p_4=p_1=1 \cdot 10^5$  Па.

Температура:

$$T_4 = T_3 \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 1114 \quad K$$

Энтропия:

$$S_4 = S_3 = 2065 \quad \text{Дж/кг} \cdot K$$

## 5. Определение параметров газа для процессов

Определение удельной теплоёмкости:

$$C_{1,2} := C_v \cdot \frac{k - k}{1 - k} \quad C_{1,2} = 0 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{град}$$

$$C_{2,3} := C_v \cdot \frac{k - n_{2,3}}{1 - n_{2,3}} \quad C_{2,3} = 999 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{град}$$

$$C_{3,4} := C_v \cdot \frac{k - k}{1 - k} \quad C_{3,4} = 0 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{град}$$

$$C_{4,1} := C_v + \frac{R}{1 - n_{4,1}} \quad C_{4,1} = 999 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{град}$$

Определение работы:

$$L_{1,2} := \left( \frac{R}{1 - n_{1,2}} \right) \cdot (T_2 - T_1) \quad L_{1,2} = -1.32 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

$$L_{2,3} := \left( \frac{R}{1 - n_{2,3}} \right) \cdot (T_3 - T_2) \quad L_{2,3} = 3.729 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

$$L_{3,4} := \left( \frac{R}{1 - k} \right) \cdot (T_4 - T_3) \quad L_{3,4} = 5.338 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

$$L_{4,1} := \left( \frac{R}{1 - n_{4,1}} \right) \cdot (T_1 - T_4) \quad L_{4,1} = -2.369 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

Определение внутренней энергии:

$$\Delta U_{1,2} := C_v \cdot (T_2 - T_1) \quad \Delta U_{1,2} = 1.964 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

$$\Delta U_{2,3} := C_v \cdot (T_3 - T_2) \quad \Delta U_{2,3} = 9.251 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

$$\Delta U_{3,4} := C_v \cdot (T_4 - T_3) \quad \Delta U_{3,4} = -5.338 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

$$\Delta U_{4,1} := C_v \cdot (T_1 - T_4) \quad \Delta U_{4,1} = -5.878 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

Определение количества тепла:

$$Q_{1,2} := \Delta U_{1,2} + L_{1,2} \quad Q_{1,2} = 6.447 \times 10^4 \quad \text{Дж/кг}$$

$$Q_{2,3} := \Delta U_{2,3} + L_{2,3} \quad Q_{2,3} = 1.298 \times 10^6 \quad \text{Дж/кг}$$

$$Q_{3,4} := \Delta U_{3,4} + L_{3,4} \quad Q_{3,4} = 0 \quad \text{Дж/кг}$$

$$Q_{4,1} := \Delta U_{4,1} + L_{4,1} \quad Q_{4,1} = -8.247 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

Определение изменения энтальпии:

$$\Delta I_{1,2} := Cp \cdot (T_2 - T_1) \quad \Delta I_{1,2} = 2.756 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

$$\Delta I_{2,3} := Cp \cdot (T_3 - T_2) \quad \Delta I_{2,3} = 1.298 \times 10^6 \quad \text{Дж/кг}$$

$$\Delta I_{3,4} := Cp \cdot (T_4 - T_3) \quad \Delta I_{3,4} = -7.489 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

$$\Delta I_{4,1} := Cp \cdot (T_1 - T_4) \quad \Delta I_{4,1} = -8.247 \times 10^5 \quad \text{Дж/кг}$$

Определение изменения энтропии:

$$\Delta S_{1,2} := S_2 - S_1 \quad \Delta S_{1,2} = 157.003 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$\Delta S_{2,3} := S_3 - S_2 \quad \Delta S_{2,3} = 1.194 \times 10^3 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$\Delta S_{3,4} := S_4 - S_3 \quad \Delta S_{3,4} = 0 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$\Delta S_{4,1} := S_1 - S_4 \quad \Delta S_{4,1} = -1.351 \times 10^3 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Определение коэффициента распределения тепла между внутренней энергией и совершаемой работой:

$$\psi_{1,2} := \frac{\Delta U_{1,2}}{Q_{1,2}} \quad \psi_{1,2} = 3.047$$

$$\psi_{2,3} := \frac{\Delta U_{2,3}}{Q_{2,3}} \quad \psi_{2,3} = 0.713$$

$$\psi_{3,4} := 0$$

$$\psi_{4,1} := \frac{\Delta U_{4,1}}{Q_{4,1}} \quad \psi_{4,1} = 0.713$$

## 6. Определение величин характеризующих цикл в целом

Определение количества подведенного за цикл тепла:

$$\Sigma Q_p := Q_{1,2} + Q_{2,3} \quad \Sigma Q_p = 1.362 \times 10^6 \text{ Дж/кг}$$

Определение количества отведенного за цикл тепла:

$$\Sigma Q_o := Q_{4,1} \quad \Sigma Q_o = -8.247 \times 10^5 \text{ Дж/кг}$$

Общая работа цикла:

$$\Sigma L := L_{1,2} + L_{2,3} + L_{3,4} + L_{4,1} \quad \Sigma L = 5.378 \times 10^5 \text{ Дж/кг}$$

Определение количества тепла преобразованного в работу:

$$\Delta Q_{\eta} := \Sigma Q_p + \Sigma Q_o \quad \Delta Q_{\eta} = 5.378 \times 10^5 \text{ Дж/кг}$$

Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии цикла:

$$\Delta U := \Delta U_{1,2} + \Delta U_{2,3} + \Delta U_{3,4} + \Delta U_{4,1} \quad \Delta U := 0 \text{ Дж/кг}$$

$$\Delta I := \Delta I_{1,2} + \Delta I_{2,3} + \Delta I_{3,4} + \Delta I_{4,1} \quad \Delta I := 0 \text{ Дж/кг}$$

$$\Delta S := \Delta S_{1,2} + \Delta S_{2,3} + \Delta S_{3,4} + \Delta S_{4,1} \quad \Delta S := 0 \text{ Дж/кг}$$

КПД и термический КПД цикла:

$$\eta_t := \frac{\Sigma L}{\Sigma Q_p} \quad \eta_t = 0.395$$

$$\eta_{tk} := 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad \eta_{tk} = 0.845$$

$$\eta_{tk} > \eta_t$$

$$0.845 > 0.395$$

## 7. Расчёты P, V и T, Sv промежуточных точек и их диаграммы

Рабочая диаграмма PV:

Для процесса 1–2:

$$\begin{aligned}
 V_{x_1} &:= V_1 & n &:= 1.6 & P_{x_1} &:= P_1 \\
 V_{x_2} &:= 0.72 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_2} &:= P_1 \cdot \left( \frac{V_1}{V_{x_2}} \right)^n & P_{x_2} &= 1.247 \times 10^5 \text{ Па} \\
 V_{x_3} &:= 0.62 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_3} &:= P_1 \cdot \left( \frac{V_1}{V_{x_3}} \right)^n & P_{x_3} &= 1.584 \times 10^5 \text{ Па} \\
 V_{x_4} &:= 0.52 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_4} &:= P_1 \cdot \left( \frac{V_1}{V_{x_4}} \right)^n & P_{x_4} &= 2.099 \times 10^5 \text{ Па} \\
 V_{x_5} &:= 0.4 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_5} &:= P_1 \cdot \left( \frac{V_1}{V_{x_5}} \right)^n & P_{x_5} &= 3.194 \times 10^5 \text{ Па} \\
 V_{x_6} &:= 0.35 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_6} &:= P_1 \cdot \left( \frac{V_1}{V_{x_6}} \right)^n & P_{x_6} &= 3.955 \times 10^5 \text{ Па} \\
 V_{x_7} &:= 0.3 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_7} &:= P_1 \cdot \left( \frac{V_1}{V_{x_7}} \right)^n & P_{x_7} &= 5.061 \times 10^5 \text{ Па} \\
 V_{x_8} &:= V_2 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_8} &:= P_2
 \end{aligned}$$

Для процесса 3-4:  $n=k$

$$\begin{aligned}
 V_{x_9} &:= V_3 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_9} &:= P_3 \\
 V_{x_{10}} &:= 1.25 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_{10}} &:= P_3 \cdot \left( \frac{V_3}{V_{x_{10}}} \right)^k & P_{x_{10}} &= 3.733 \times 10^5 \text{ Па} \\
 V_{x_{11}} &:= 1.6 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_{11}} &:= P_3 \cdot \left( \frac{V_3}{V_{x_{11}}} \right)^k & P_{x_{11}} &= 2.64 \times 10^5 \text{ Па} \\
 V_{x_{12}} &:= 1.95 \text{ м}^3/\text{кг} & P_{x_{12}} &:= P_3 \cdot \left( \frac{V_3}{V_{x_{12}}} \right)^k & P_{x_{12}} &= 2 \times 10^5 \text{ Па}
 \end{aligned}$$

$$V_{x_{12}} := 1.95 \text{ м}^3/\text{кг} \quad P_{x_{12}} := P_3 \cdot \left( \frac{V_3}{V_{x_{12}}} \right)^{\kappa} \quad P_{x_{12}} = 2 \times 10^5 \text{ Па}$$

$$V_{x_{13}} := 2.3 \text{ м}^3/\text{кг} \quad P_{x_{13}} := P_3 \cdot \left( \frac{V_3}{V_{x_{13}}} \right)^{\kappa} \quad P_{x_{13}} = 1.587 \times 10^5 \text{ Па}$$

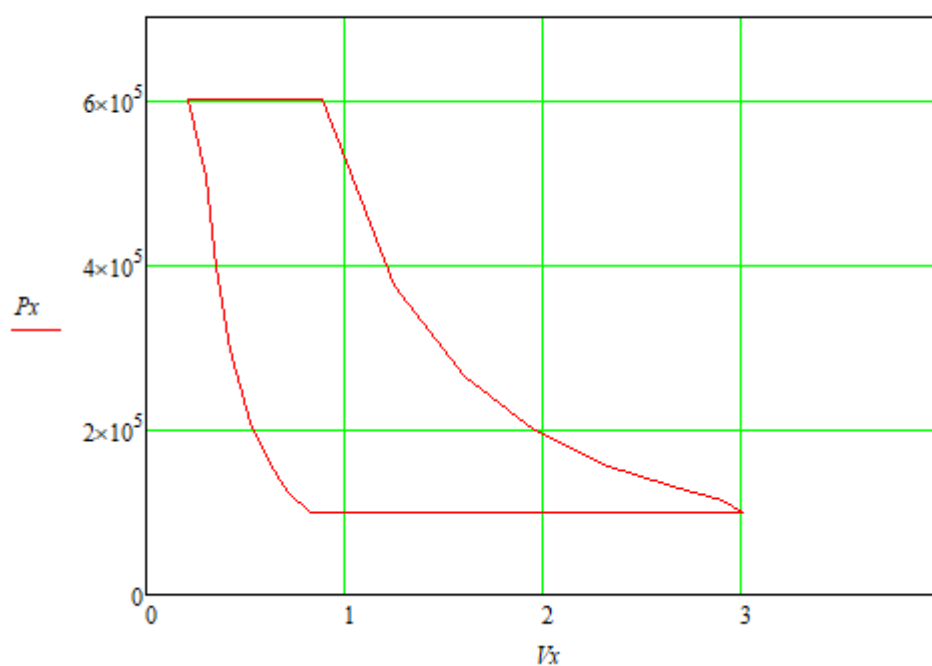
$$V_{x_{14}} := 2.65 \text{ м}^3/\text{кг} \quad P_{x_{14}} := P_3 \cdot \left( \frac{V_3}{V_{x_{14}}} \right)^{\kappa} \quad P_{x_{14}} = 1.301 \times 10^5 \text{ Па}$$

$$V_{x_{15}} := 2.9 \text{ м}^3/\text{кг} \quad P_{x_{15}} := P_3 \cdot \left( \frac{V_3}{V_{x_{15}}} \right)^{\kappa} \quad P_{x_{15}} = 1.146 \times 10^5 \text{ Па}$$

$$V_{x_{16}} := V_4 \quad P_{x_{16}} := P_4$$

$$V_{x_0} := V_4 \quad P_{x_0} := P_4$$

Рабочая диаграмма



Тепловая диаграмма TS:

Для процесса 2-3:

$$Tx_1 := T_2$$

$$Sx_1 := S_2$$

$$Tx_2 := 775 \text{ К} \quad Sx_2 := S_2 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_2}{T_2}\right) \quad Sx_2 = 1.189 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$Tx_3 := 990 \text{ К} \quad Sx_3 := S_2 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_3}{T_2}\right) \quad Sx_3 = 1.434 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$Tx_4 := 1205 \text{ К} \quad Sx_4 := S_2 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_4}{T_2}\right) \quad Sx_4 = 1.63 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$Tx_5 := 1420 \text{ К} \quad Sx_5 := S_2 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_5}{T_2}\right) \quad Sx_5 = 1.794 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$Tx_6 := 1635 \text{ К} \quad Sx_6 := S_2 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_6}{T_2}\right) \quad Sx_6 = 1.935 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$Tx_7 := 1850 \text{ К} \quad Sx_7 := S_2 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_7}{T_2}\right) \quad Sx_7 = 2.058 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Для процесса 4-1:

$$Tx_9 := T_4$$

$$Sx_9 := S_4$$

$$Tx_{10} := 900 \text{ К} \quad Sx_{10} := S_4 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_{10}}{T_4}\right) \quad Sx_{10} = 1.853 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$Tx_{11} := 700 \text{ К} \quad Sx_{11} := S_4 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_{11}}{T_4}\right) \quad Sx_{11} = 1.602 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$Tx_{12} := 500 \text{ К} \quad Sx_{12} := S_4 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_{12}}{T_4}\right) \quad Sx_{12} = 1.265 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$Tx_{13} := 300 \text{ К} \quad Sx_{13} := S_4 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_{13}}{T_4}\right) \quad Sx_{13} = 755.058 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

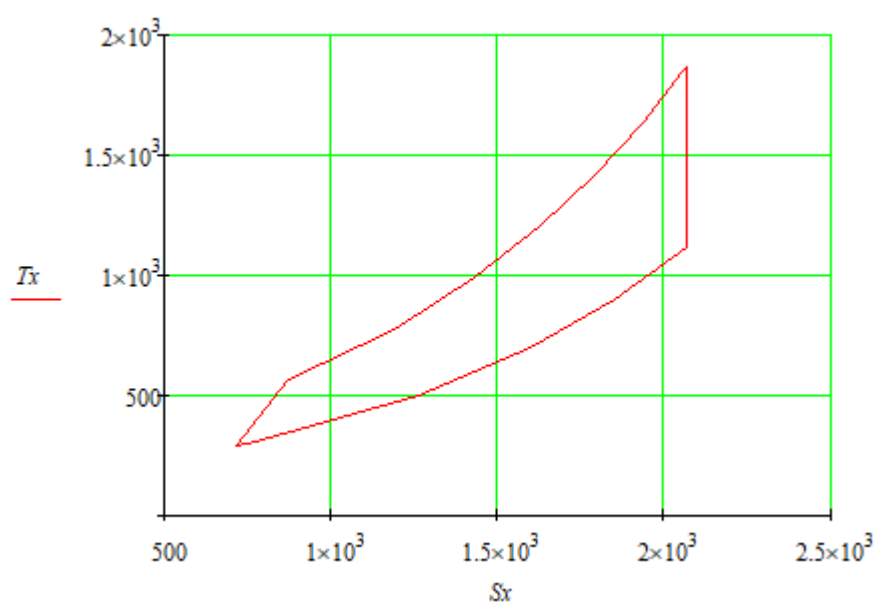
$$Tx_{14} := 500 \text{ К} \quad Sx_{14} := S_4 + Cp \cdot \ln\left(\frac{Tx_{14}}{T_4}\right) \quad Sx_{14} = 1.265 \times 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$T_{x_{15}} := 300 \text{ K} \quad S_{x_{15}} := S_4 + C_p \cdot \ln\left(\frac{T_{x_{15}}}{T_4}\right) \quad S_{x_{15}} = 755.058 \quad \text{Дж/кг} \cdot \text{K}$$

$$T_{x_{16}} := T_1 \quad S_{x_{16}} := S_1$$

$$T_{x_0} := T_1 \quad S_{x_0} := S_1$$

### Тепловая диаграмма





### **Список использованной литературы**

1. Андриющенко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов. «Высшая школа», М.,1975.
2. Балахонцев Е.В. Основы технической термодинамики. «Оборонгиз», М.,1965.
3. Болгарский А.В. и др. Термодинамика и теплопередача. «Высшая школа».М., 1975.
4. Буров А.Л. Тепловые двигатели. «Москва». 2003.
5. Вукалович М.П. и Новиков И.И. Термодинамика. «Машиностроение», М.,1972.
6. Иноземцев Н.В. Курс тепловых двигателей. «Оборонгиз». М., 1954.
7. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. «Высшая школа», М., 1975.