

# Выполнение расчетного задания #1 по курсу “Термодинамика” с вычислениями в среде Wolfram Mathematica

*Маркаров М.Г.  
ТФ-13-22.  
Вариант 114*

Рабочее тело-бинарная смесь.

1)Аргон,  $\mu_1=39.948$ ,  $\omega_1=0.65$

2)CO<sub>2</sub>,  $\mu_2=44.011$

Цикл состоит из процессов:

1-2 V-const

2-3 T-const

3-4 S-const

4-5 P-const

5-1 n=1.14

In[1]:=  $\omega_1 = 0.65$ ;  $\omega_2 = 1 - \omega_1$ ;

$$x_1 = \frac{\frac{\omega_1}{\mu_1}}{\frac{\omega_1}{\mu_1} + \frac{\omega_2}{\mu_2}};$$

$x_2 = 1 - x_1$ ;

$\mu_1 = \text{Quantity}[39.948, \frac{\text{"Kilograms"}}{\text{"Kilomoles"}}]$ ;

$\mu_2 = \text{Quantity}[44.011, \frac{\text{"Kilograms"}}{\text{"Kilomoles"}}]$ ;  $p_1 = \text{Quantity}[1.85 * 10^3, \text{"Kilopascals"}]$ ;

$T_1 = \text{Quantity}[250 + 273.15, \text{"Kelvins"}]$ ;

$p_2 = 1.35 * p_1$ ;

$p_0 = \text{Quantity}[100, \text{"Kilopascals"}]$ ;

$v_3 = 1.5 * v_1$ ;

$T_4 = \text{Quantity}[15 + 273.15, \text{"Kelvins"}]$ ;

In[2]:=  $R_{\text{molar}} = \text{Quantity}[8.31447, \frac{\text{"Kilojoules}}{\text{"Kilomoles"} * \text{"Kelvins"}}]$ ;

In[3]:=  $R_1 = \frac{R_{\text{molar}}}{\mu_1}$

Out[3]= 0.208132 kJ / (kg K)

In[4]:=  $R_2 = \frac{R_{\text{molar}}}{\mu_2}$

Out[4]= 0.188918 kJ / (kg K)

In[5]:=  $R = \omega_1 * R_1 + \omega_2 * R_2$

Out[5]= 0.201407 kJ / (kg K)

### Рассмотрим процесс 1-2 (V-const)

```
In[6]:= v1 = UnitSimplify[R *  $\frac{T1}{p1}$ ]
```

```
Out[6]= 0.0569547 m³/kg
```

```
In[7]:= v2 = v1; T2 =  $\frac{p2}{p1}$  * T1
```

```
Out[7]= 706.253 K
```

```
In[8]:= UnitConvert[Quantity[706.253, "Kelvins"], "DegreesCelsius"]
```

```
Out[8]= 433.103 °C
```

```
In[9]:= {p1, v1, T1}
```

```
Out[9]= {1850. kPa, 0.0569547 m³/kg, 523.15 K}
```

Найдем значения  $u, h, s$  в первой точке цикла.

Сначала для каждого компонента по отдельности, потом для смеси.

Значения относящиеся к компоненту 1 (Ar) смеси будут заканчиваться на Ar, например удельная энтальпия аргона в точке 1 будет обозначаться как  $h1Ar$   
Для аргона (Ar):

```
In[10]:= u1Ar = Quantity[163.3,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
```

```
h1Ar = Quantity[272.2,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
```

```
s0atZeroLevelAr = Quantity[3.831,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"} * \text{"Kelvins"}}$ ];
```

```
s01Ar = Quantity[4.169,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"} * \text{"Kelvins"}}$ ];
```

```
In[11]:= s1Ar = s01Ar - s0atZeroLevelAr - R1 * Log[ $\frac{p1}{p0}$ ]
```

```
Out[11]= -0.269282 kJ / (kg K)
```

Для диоксида углерода (CO2):

```
In[12]:= u1CO2 = Quantity[326.4,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
```

```
h1CO2 = Quantity[425.2,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
```

```
s0atZeroLevelCO2 = Quantity[4.785,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"} * \text{"Kelvins"}}$ ];
```

```
s01CO2 = Quantity[5.384,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"} * \text{"Kelvins"}}$ ];
```

In[13]:=

In[14]:=  $s1C02 = s01C02 - s0atZeroLevelC02 - R2 * \text{Log}\left[\frac{p1}{p0}\right]$ 

Out[14]=

0.0477806 kJ / (kg K)

**Энтропия смешения смеси:**In[15]:=  $\Delta S_{\text{смеш}} = R_{\text{molar}} * \left( \frac{\omega1}{\mu1} * \text{Log}\left[\frac{1}{x1}\right] + \frac{\omega2}{\mu2} * \text{Log}\left[\frac{1}{x2}\right] \right)$ 

Out[15]=

0.127484 kJ / (kg K)

**u,h,s смеси в точке 1:**In[16]:=  $u1 = \omega1 * u1Ar + \omega2 * u1C02$ 

Out[16]=

220.385 kJ/kg

In[17]:=  $h1 = \omega1 * h1Ar + \omega2 * h1C02$ 

Out[17]=

325.75 kJ/kg

In[18]:=  $s1 = \omega1 * s1Ar + \omega2 * s1C02 + \Delta S_{\text{смеш}}$ 

Out[18]=

-0.0308264 kJ / (kg K)

In[19]:=  $s1Check = (\omega1 * s01Ar + \omega2 * s01C02) -$  $(\omega1 * s0atZeroLevelAr + \omega2 * s0atZeroLevelC02) - R * \text{Log}\left[\frac{p1}{p0}\right] + \Delta S_{\text{смеш}}$ 

Out[19]=

-0.0308264 kJ / (kg K)

In[20]:=  $sZero = (\omega1 * s0atZeroLevelAr + \omega2 * s0atZeroLevelC02) ;$ In[21]:=  $\{u1, h1, s1\}$ 

Out[21]=

 $\left\{ 220.385 \text{ kJ/kg} , 325.75 \text{ kJ/kg} , -0.0308264 \text{ kJ / (kg K)} \right\}$ In[22]:=  $\{p1, v1, T1\}$ 

Out[22]=

 $\left\{ 1850. \text{ kPa} , 0.0569547 \text{ m}^3/\text{kg} , 523.15 \text{ K} \right\}$ **Найдем значения u,h,s во второй точке цикла. Отдельно по компонентам.  
Для диоксида углерода(CO2):**In[23]:=  $T2$ 

Out[23]=

706.253 K

```
In[24]:= UnitConvert[Quantity[706.253, "Kelvins"], "DegreesCelsius"]
```

```
Out[24]= 433.103 °C
```

Значение температуры не является табличным, поэтому для поиска  $u_2, h_2, s_2$  будем пользоваться линейной интерполяцией. Для сохранения места все приближения функций находится в другом файле.

```
In[25]:= u2CO2 = Quantity[489.91682, "Kilojoules" / "Kilograms"];
h2CO2 = Quantity[623.27536, "Kilojoules" / "Kilograms"];
s02CO2 = Quantity[5.7079648, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")];
```

Для аргона(Ar):

```
In[26]:= u2Ar = Quantity[220.49296, "Kilojoules" / "Kilograms"];
h2Ar = Quantity[367.51356, "Kilojoules" / "Kilograms"];
s02Ar = Quantity[4.3248618, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")];
```

```
In[27]:=
```

Значения  $u, h, s$  во второй точке цикла для смеси

```
In[28]:= u2 = ω1 * u2Ar + ω2 * u2CO2
```

```
Out[28]= 314.791 kJ/kg
```

```
In[29]:= h2 = ω1 * h2Ar + ω2 * h2CO2
```

```
Out[29]= 457.03 kJ/kg
```

```
In[30]:= s2 = (ω1 * s02Ar + ω2 * s02CO2) - sZero - R * Log[ $\frac{p_2}{p_0}$ ] + ΔScмеш
```

```
Out[30]= 0.123428 kJ / (kg K)
```

```
In[31]:= {u2, h2, s2}
```

```
Out[31]= { 314.791 kJ/kg , 457.03 kJ/kg , 0.123428 kJ / (kg K) }
```

```
In[32]:= {p2, v2, T2}
```

```
Out[32]= { 2497.5 kPa , 0.0569547 m³/kg , 706.253 K }
```

Рассмотрим процесс 2-3 (T-const)

```
In[33]:= p3 = p2 *  $\frac{v_2}{v_3}$ 
```

```
Out[33]= 1665. kPa
```

```
In[34]:= T3 = T2
```

```
Out[34]= 706.253 K
```

```
In[35]:= {p3, v3, T3}
```

```
Out[35]= { 1665. kPa , 0.0854321 m³/kg , 706.253 K }
```

Найдем значения  $u, h, s$  в третьей точке цикла. Учтем что при  $T\text{-const}$  :  $du=0$ ,  $dh=0$ .

```
In[36]:= u3 = u2
```

```
Out[36]= 314.791 kJ/kg
```

```
In[37]:= h3 = h2
```

```
Out[37]= 457.03 kJ/kg
```

```
In[38]:= s03Ar = s02Ar
```

```
Out[38]= 4.32486 kJ / (kg K)
```

```
In[39]:= s03CO2 = s02CO2
```

```
Out[39]= 5.70796 kJ / (kg K)
```

```
In[40]:= s3 = (w1 * s03Ar + w2 * s03CO2) - sZero - R * Log[ $\frac{p3}{p0}$ ] + ΔScмеш
```

```
Out[40]= 0.205092 kJ / (kg K)
```

```
In[41]:= {u3, h3, s3}
```

```
Out[41]= { 314.791 kJ/kg , 457.03 kJ/kg , 0.205092 kJ / (kg K) }
```

```
In[42]:= {p3, v3, T3}
```

```
Out[42]= { 1665. kPa , 0.0854321 m³/kg , 706.253 K }
```

Рассмотрим процесс 3-4 (S-const)

```
In[43]:= T4
```

```
Out[43]= 288.15 K
```

```
In[44]:= UnitConvert[Quantity[288.15, "Kelvins"], "DegreesCelsius"]
```

```
Out[44]= 15. °C
```

In[45]:= **s4 = s3**

Out[45]=

0.205092 kJ / (kg K)

In[46]:= **s03 = (ω1 \* s03Ar + ω2 \* s03C02)**

Out[46]=

4.80895 kJ / (kg K)

Найдем s04 каждого компонента смеси:

In[47]:= **s04Ar = Quantity[3.858,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"} * \text{"Kelvins"}}]$ ];**

**s04C02 = Quantity[4.829,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"} * \text{"Kelvins"}}]$ ];**

In[48]:= **s04 = ω1 \* s04Ar + ω2 \* s04C02**

Out[48]=

4.19785 kJ / (kg K)

In[49]:= **p4 = p3 \* Exp[ $\frac{s04 - s03}{R}$ ]**

Out[49]=

80.1132 kPa

In[50]:= **v4 = UnitSimplify[R \*  $\frac{T4}{p4}$ ]**

Out[50]=

0.724419 m<sup>3</sup>/kg

In[51]:= **{p4, v4, T4}**

Out[51]=

{ 80.1132 kPa , 0.724419 m<sup>3</sup>/kg , 288.15 K }

Найдем значения u,h,s в четвертой точке цикла.Учтем что при процессе 3-4 s-const,поэтому s4=s3.Температура T4 является узлом справочной таблицы,поэтому обходимся без интерполяции для нахождения u4,h4 каждого компонента смеси.

In[52]:= **T4**

Out[52]=

288.15 K

In[53]:= **UnitConvert[Quantity[288.15, "Kelvins"], "DegreesCelsius"]**

Out[53]=

15. °C

```

In[54]:= u4CO2 = Quantity[150,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
          h4CO2 = Quantity[204.4,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
          u4Ar = Quantity[89.9,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
          h4Ar = Quantity[149.9,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];

In[55]:= u4 =  $\omega_1 * u4Ar + \omega_2 * u4CO2$ 
Out[55]=
          110.935 kJ/kg

In[56]:= h4 =  $\omega_1 * h4Ar + \omega_2 * h4CO2$ 
Out[56]=
          168.975 kJ/kg

In[57]:= s4
Out[57]=
          0.205092 kJ / (kg K)

In[58]:=
          {u4, h4, s4}
Out[58]=
          { 110.935 kJ/kg , 168.975 kJ/kg , 0.205092 kJ / (kg K) }

In[59]:= {p4, v4, T4}
Out[59]=
          { 80.1132 kPa , 0.724419 m3/kg , 288.15 K }

```

Рассмотрим процесс 4-5 (p-const) и одновременно процесс 5-1 (n=1.14)

```

In[60]:= p5 = p4
Out[60]=
          80.1132 kPa

```

v<sub>5</sub>, T<sub>5</sub>-неизвестны. Мы можем составить систему из двух уравнений, где первое описывает процесс 4-5 Изобарный (известно v<sub>4</sub>, T<sub>4</sub>), а второе описывает процесс 5-1 политропный (известно v<sub>1</sub>, T<sub>1</sub>, n). Такая система будет однозначно решаться относительно параметров {v<sub>5</sub>, T<sub>4</sub>}.

Первое уравнение (Изобарный процесс 4-5):  $\frac{v_4}{T_4} = \frac{v_5}{T_5}$

Второе уравнение (Политропный процесс 5-1):  $T_5 * v_5^{n-1} = T_1 * v_1^{n-1}$ ; n=1.14

```

In[61]:= {v4, T4}
Out[61]=
          { 0.724419 m3/kg , 288.15 K }

```



In[62]:= {v1, T1}

Out[62]=

$\{0.0569547 \text{ m}^3/\text{kg}, 523.15 \text{ K}\}$

In[63]:=  $\text{NSolve}\left[\xi * \left(\frac{0.724419}{288.16} * \xi\right)^{1.14-1} == 523.15 * 0.0569547^{1.14-1}, \xi\right]$

Out[63]=

$\{\xi \rightarrow 355.783\}$

In[64]:= T5 = Quantity[355.783, "Kelvins"]

Out[64]=

355.783 K

In[65]:=  $v5 = v4 * \frac{T5}{T4}$

Out[65]=

0.89445 m<sup>3</sup>/kg

**Solve:** Inverse functions are being used by Solve, so some solutions may not be found; use Reduce for complete solution information.

**Solve:** Solve was unable to solve the system with inexact coefficients or the system obtained by direct rationalization of inexact numbers present in the system. Since many of the methods used by Solve require exact input, providing Solve with an exact version of the system may help.

In[66]:=

In[67]:= {p5, v5, T5}

Out[67]=

$\{80.1132 \text{ kPa}, 0.89445 \text{ m}^3/\text{kg}, 355.783 \text{ K}\}$

Найдем значения u,h,s в пятой точке цикла. Учтем, что T5=355.783K не является точным узлом справочной таблицы, поэтому воспользуемся линейной интерполяцией по узлам t=80°C и t=85°C. Данные об интерполяционных полиномах в отдельном файле.

CO2:

In[68]:= T5

Out[68]=

355.783 K

In[69]:= UnitConvert[Quantity[355.783, "Kelvins"], "DegreesCelsius"]

Out[69]=

82.633 °C

In[70]:= u5CO2 = Quantity[195.89576000000002, "Kilojoules" / "Kilograms"]

Out[70]=

195.896 kJ/kg

In[71]:= h5CO2 = Quantity[263.0697, "Kilojoules" / "Kilograms"]

Out[71]=

263.07 kJ/kg

```
In[72]:= s05C02 = Quantity[5.0118458, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")]
Out[72]=
5.01185 kJ / (kg K)
```

Ar:

```
In[73]:= u5Ar = Quantity[111.04256000000001, "Kilojoules" / "Kilograms"]
Out[73]=
111.043 kJ/kg
```

```
In[74]:= h5Ar = Quantity[185.06916, "Kilojoules" / "Kilograms"]
Out[74]=
185.069 kJ/kg
```

```
In[75]:= s05Ar = Quantity[3.9676862, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")]
Out[75]=
3.96769 kJ / (kg K)
```

Найдем u,h,s смеси в точке 5 цикла

```
In[76]:= u5 = ω1 * u5Ar + ω2 * u5C02
Out[76]=
140.741 kJ/kg
```

```
In[77]:= h5 = ω1 * h5Ar + ω2 * h5C02
Out[77]=
212.369 kJ/kg
```

```
In[78]:= s5 = (ω1 * s05Ar + ω2 * s05C02) - sZero - R * Log[ $\frac{p5}{p0}$ ] + ΔScмеш
Out[78]=
0.340384 kJ / (kg K)
```

```
In[79]:= {u5, h5, s5}
Out[79]=
{ 140.741 kJ/kg , 212.369 kJ/kg , 0.340384 kJ / (kg K) }
```

```
In[80]:= {p5, v5, T5}
Out[80]=
{ 80.1132 kPa , 0.89445 m³/kg , 355.783 K }
```

Сведем все результаты вычислений в одну таблицу {p,v,T,u,h,s}

```
In[81]:= p = {p1, p2, p3, p4, p5};
v = {v1, v2, v3, v4, v5};
T = {T1, T2, T3, T4, T5};
u = {u1, u2, u3, u4, u5};
h = {h1, h2, h3, h4, h5};
s = {s1, s2, s3, s4, s5};
```

```
In[82]:=
```

In[83]:=

```
In[84]:= Insert[ReplacePart[Grid[Transpose[{Range[5], p, v, T, u, h, s}]],
  1 → Prepend[First[Insert[Grid[Transpose[{Range[5], p, v, T, u, h, s}], Frame → True],
    {Dividers → All, Spacings → 1.5 {1, 1}}, 2]],
    {"Точка цикла", "p", "v", "T", "u", "h", "s"}]],
  {Dividers → All, Spacings → 1.5 {1, 1}}, 2]
```

Out[84]=

Точка цикла	p	v	T	u	h	s
1	1850. kPa	0.05695; 47 m <sup>3</sup> /kg	523.15 K	220.385 kJ/kg	325.75 kJ/kg	-0.0308; 264 kJ/( kg K)
2	2497.5 kPa	0.05695; 47 m <sup>3</sup> /kg	706.253 K	314.791 kJ/kg	457.03 kJ/kg	0.123428 kJ/( kg K)
3	1665. kPa	0.08543; 21 m <sup>3</sup> /kg	706.253 K	314.791 kJ/kg	457.03 kJ/kg	0.205092 kJ/( kg K)
4	80.1132 kPa	0.724419 m <sup>3</sup> /kg	288.15 K	110.935 kJ/kg	168.975 kJ/kg	0.205092 kJ/( kg K)
5	80.1132 kPa	0.89445 m <sup>3</sup> /kg	355.783 K	140.741 kJ/kg	212.369 kJ/kg	0.340384 kJ/( kg K)

In[85]:=

Расчет теплоты, работы и средней температуры подвода тепла в каждом процессе

Процесс 1-2: V=const

In[86]:=  $\Delta u_{12} = u_2 - u_1$ 

Out[86]=

94.4063 kJ/kg

In[87]:=  $\Delta h_{12} = h_2 - h_1$ 

Out[87]=

131.28 kJ/kg

In[88]:=  $\Delta s_{12} = s_2 - s_1$

Out[88]=

0.154255 kJ / (kg K)

In[89]:=  $l_{12} = 0; q_{12} = \Delta u_{12}$

Out[89]=

94.4063 kJ / kg

In[90]:=  $T_{12} = \frac{q_{12}}{\Delta s_{12}}$

Out[90]=

612.016 K

### Процесс 2-3: T-const

In[91]:=  $\Delta u_{23} = u_3 - u_2$

Out[91]=

0. kJ / kg

In[92]:=  $\Delta h_{23} = h_3 - h_2$

Out[92]=

0. kJ / kg

In[93]:=  $\Delta s_{23} = s_3 - s_2$

Out[93]=

0.0816636 kJ / (kg K)

In[94]:=  $T_{23} = T_2$

Out[94]=

706.253 K

In[95]:=  $q_{23} = T_{23} * \Delta s_{23}$

Out[95]=

57.6751 kJ / kg

In[96]:=  $l_{23} = q_{23}$

Out[96]=

57.6751 kJ / kg

### Процесс 3-4: S-const

In[97]:=  $\Delta u_{34} = u_4 - u_3$

Out[97]=

-203.856 kJ / kg

In[98]:=  $\Delta h_{34} = h_4 - h_3$

Out[98]=

-288.055 kJ / kg

In[99]:=  $\Delta s_{34} = s_4 - s_3$

Out[99]=  
 $0. \text{ kJ} / (\text{kg K})$

In[100]:=  $l_{34} = -\Delta u_{34}$

Out[100]=  
 $203.856 \text{ kJ/kg}$

In[101]:=  $q_{34} = \text{Quantity}\left[0, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}\right]$

Out[101]=  
 $0 \text{ kJ/kg}$

In[102]:=  $T_{34} = \text{Quantity}[0, \text{"Kelvins"}]$

Out[102]=  
 $0 \text{ K}$

## Процесс 4-5: P-const

In[103]:=  $\Delta u_{45} = u_5 - u_4$

Out[103]=  
 $29.8062 \text{ kJ/kg}$

In[104]:=  $\Delta h_{45} = h_5 - h_4$

Out[104]=  
 $43.3943 \text{ kJ/kg}$

In[105]:=  $\Delta s_{45} = s_5 - s_4$

Out[105]=  
 $0.135292 \text{ kJ} / (\text{kg K})$

In[106]:=  $q_{45} = \Delta h_{45}$

Out[106]=  
 $43.3943 \text{ kJ/kg}$

In[107]:=  $l_{45} = q_{45} - \Delta u_{45}$

Out[107]=  
 $13.5882 \text{ kJ/kg}$

In[108]:=  $T_{45} = \frac{q_{45}}{\Delta s_{45}}$

Out[108]=  
 $320.746 \text{ K}$

## Процесс 5-1: $n=1.14$ , $n$ -const

In[109]:=

$$n = 1.14$$

Out[109]=

$$1.14$$

In[110]:=

$$\Delta u_{51} = u_1 - u_5$$

Out[110]=

$$79.6438 \text{ kJ/kg}$$

In[111]:=

$$\Delta h_{51} = h_1 - h_5$$

Out[111]=

$$113.381 \text{ kJ/kg}$$

In[112]:=

$$\Delta s_{51} = s_1 - s_5$$

Out[112]=

$$-0.37121 \text{ kJ / (kg K)}$$

In[113]:=

$$l_{51} = R * \frac{(T_5 - T_1)}{n - 1}$$

Out[113]=

$$-240.778 \text{ kJ/kg}$$

In[114]:=

$$q_{51} = l_{51} + \Delta u_{51}$$

Out[114]=

$$-161.134 \text{ kJ/kg}$$

In[115]:=

$$T_{51} = \frac{q_{51}}{\Delta s_{51}}$$

Out[115]=

$$434.078 \text{ K}$$

## Составим таблицу $\{\Delta u, \Delta h, \Delta s, l, q, \bar{T}\}$

In[193]:=

```

Δu = {Δu12, Δu23, Δu34, Δu45, Δu51, ΣΔu};
Δh = {Δh12, Δh23, Δh34, Δh45, Δh51, ΣΔh};
Δs = {Δs12, Δs23, Δs34, Δs45, Δs51, ΣΔs};
l = {l12, l23, l34, l45, l51, Σl};
q = {q12, q23, q34, q45, q51, Σq};
Tmid = {T12, T23, T34, T45, T51, {TmidNEG,
    TmidPOS}};

```

In[199]:=

```
Magnify[Insert[ReplacePart[
  Grid[Transpose[{{12, 23, 34, 45, 51, "Цикл"}, Δu, Δh, Δs, l, q, Tmid}]], 1 → Prepend[
    First[Grid[Transpose[{{12, 23, 34, 45, 51, "Цикл"}, Δu, Δh, Δs, l, q, Tmid}]]],
    {"Процесс", "Δu", "Δh", "Δs", "l", "q", "Tmid"}]],
  {Dividers → All, Spacings → 1.5 {1, 1}}, 2], 0.8]
```

Out[199]=

Процесс	$\Delta u$	$\Delta h$	$\Delta s$	$l$	$q$	$T_{mid}$
12	94.4063 kJ/kg	131.28 kJ/kg	0.154255 kJ / (kg K)	0	94.4063 kJ/kg	612.016 K
23	0. kJ/kg	0. kJ/kg	0.0816636 kJ / (kg K)	57.6751 kJ/kg	57.6751 kJ/kg	706.253 K
34	-203.856 kJ/kg	-288.055 kJ/kg	0. kJ / (kg K)	203.856 kJ/kg	0 kJ/kg	0 K
45	29.8062 kJ/kg	43.3943 kJ/kg	0.135292 kJ / (kg K)	13.5882 kJ/kg	43.3943 kJ/kg	320.746 K
51	79.6438 kJ/kg	113.381 kJ/kg	-0.37121 kJ / (kg K)	-240.778 kJ/kg	-161.134 kJ/kg	434.078 K
Цикл	0. kJ/kg	$2.84217 \times 10^{-14}$ kJ/kg	0. kJ / (kg K)	34.3415 kJ/kg	34.3415 kJ/kg	{ 434.078 K , 526.59 K }

## Полный цикл

In[126]:=

$$\Sigma \Delta u = \Delta u_{12} + \Delta u_{23} + \Delta u_{34} + \Delta u_{45} + \Delta u_{51}$$

Out[126]=

0. kJ/kg

In[127]:=

$$\Sigma \Delta h = \Delta h_{12} + \Delta h_{23} + \Delta h_{34} + \Delta h_{45} + \Delta h_{51}$$

Out[127]=

$$2.84217 \times 10^{-14} \text{ kJ/kg}$$

In[128]:=

$$\Sigma \Delta s = \Delta s_{12} + \Delta s_{23} + \Delta s_{34} + \Delta s_{45} + \Delta s_{51}$$

Out[128]=

$$0. \text{ kJ} / (\text{kg K})$$

In[129]:=

$$\Sigma q = q_{12} + q_{23} + q_{34} + q_{45} + q_{51}$$

Out[129]=

$$34.3415 \text{ kJ/kg}$$

In[130]:=

$$\Sigma l = l_{12} + l_{23} + l_{34} + l_{45} + l_{51}$$

Out[130]=

$$34.3415 \text{ kJ/kg}$$

In[131]:=

$$\Sigma q_{POS} = q_{12} + q_{23} + q_{45}$$

Out[131]=

$$195.476 \text{ kJ/kg}$$

In[132]:=

$$\Sigma \Delta s_{POS} = \Delta s_{12} + \Delta s_{23} + \Delta s_{45}$$

Out[132]=

$$0.37121 \text{ kJ} / (\text{kg K})$$

### Температура при подводе тепла:

In[133]:=

$$T_{midPOS} = \frac{\Sigma q_{POS}}{\Sigma \Delta s_{POS}}$$

Out[133]=

$$526.59 \text{ K}$$

In[134]:=

$$\Sigma q_{NEG} = q_{51}$$

Out[134]=

$$-161.134 \text{ kJ/kg}$$

In[135]:=

$$\Sigma \Delta s_{NEG} = \Delta s_{51}$$

Out[135]=

$$-0.37121 \text{ kJ} / (\text{kg K})$$

### Температура при отводе тепла:

In[136]:=

$$T_{midNEG} = \frac{\Sigma q_{NEG}}{\Sigma \Delta s_{NEG}}$$

Out[136]=

$$434.078 \text{ K}$$



## Термический КПД цикла:

In[137]:=

$$\eta = \frac{\Sigma l}{\Sigma q_{POS}}$$

Out[137]=

0.175682

In[138]:=

**T**

Out[138]=

{ 523.15 K , 706.253 K , 706.253 K , 288.15 K , 355.783 K }

In[139]:=

**s**

Out[139]=

{ -0.0308264 kJ / (kg K) , 0.123428 kJ / (kg K) ,  
0.205092 kJ / (kg K) , 0.205092 kJ / (kg K) , 0.340384 kJ / (kg K) }

In[140]:=

In[141]:=

**Ts = Range[Length[T]];**

In[142]:=

**For[i = 1, i ≤ Length[T], i++, Ts[[i]] = {T[[i]], s[[i]]}]**

In[143]:=

**Ts**

Out[143]=

{ { 523.15 K , -0.0308264 kJ / (kg K) },  
{ 706.253 K , 0.123428 kJ / (kg K) }, { 706.253 K , 0.205092 kJ / (kg K) },  
{ 288.15 K , 0.205092 kJ / (kg K) }, { 355.783 K , 0.340384 kJ / (kg K) } }

In[144]:=

**TsPlot = Show[Show[ListLinePlot[{Ts, {{ 523.15` K , -0.030826448130162984` kJ / (kg K) },  
{ 355.783` K , 0.3403838397541039` kJ / (kg K) }}}], PlotTheme → "Scientific",  
InterpolationOrder → 1, PlotStyle → Gray, PlotMarkers → {Automatic, 14}],  
Axes → True, AxesStyle → Black], AxesLabel →  
{RowBoxes[RowBox[{"T", " ", " ", " ", "Kelvin"}]], RowBoxes[RowBox[{"s", " ", " ", " ",  
RowBox[{"kJ", " / ", RowBox[{"(", RowBox[{"kg", " \* ", "K"}], ")"}]}]}]],  
PlotLabel → HoldForm[T - s диаграмма цикла], LabelStyle → {GrayLevel[0], Italic}];**

In[277]:=

```
marker1 = Graphics[Text["1", {523.15, -0.0308264}, {-5, 0}]];
marker2 = Graphics[Text["2", {706.253, 0.123428}, {+5, 0}]];
marker3 = Graphics[Text["3", {706.253, 0.205092}, {+4, -0.7}]];
marker4 = Graphics[Text["4", {288.15, 0.205092}, {5, 0}]];
marker5 = Graphics[Text["5", {355.783, 0.340384}, {-5, 0}]];
```

## $T$ - $s$ диаграмма цикла

In[282]:=

```
Show[Show[Show[ListLinePlot[
  {Ts, {{523.15 K, -0.0308264 kJ/(kg K)}, {355.783 K, 0.340384 kJ/(kg K)}}},
  PlotTheme → "Scientific", InterpolationOrder → 1, PlotStyle → Gray,
  PlotMarkers → {Automatic, 10}, PlotLegends → "1-2 v-Const",

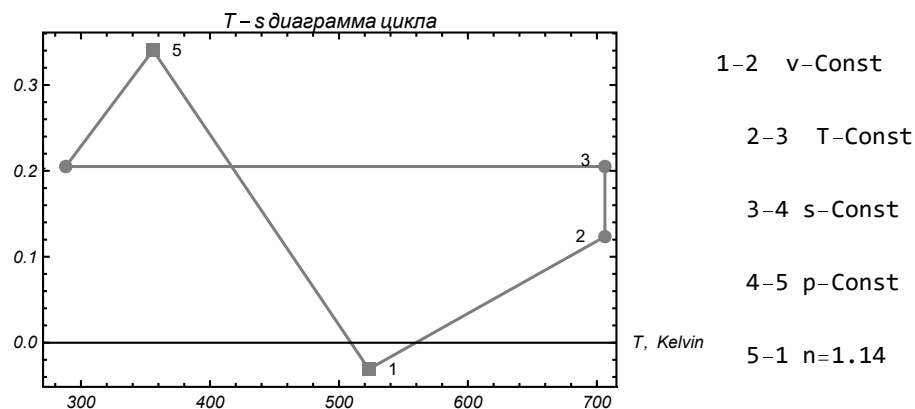
  2-3 T-Const

  3-4 s-Const

  4-5 p-Const

  5-1 n=1.14"], Axes → True, AxesStyle → Black], AxesLabel →
  {RowBoxes[RowBox[{"T", " ", " ", " ", "Kelvin"}]], RowBoxes[RowBox[{"s", " ", " ", " ",
    RowBox[{"kJ", "/", RowBox[{"(", RowBox[{"kg", "*", "K"}], ")"}]}]}]]],
  PlotLabel → HoldForm[T - s диаграмма цикла], LabelStyle → {GrayLevel[0], Italic}],
  marker1, marker2, marker3, marker4, marker5]
```

Out[282]=



Set: Tag Plus in -1.14 + 5 is Protected.

Диаграмму цикла в  $p$ - $v$  координатах построим с применением пакета *Matlab*, см. приложение

In[154]:=

In[155]:=