

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

Жаркова А.Э.  
ТФ-13-22.  
Вариант 107

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=1.13

In[319]:=

$\omega_1 = 0.65; \omega_2 = 1 - \omega_1;$

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

$x_2 = 1 - x_1;$

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

$\mu_2 = \text{Quantity}\left[44.011, \frac{\text{"Kilograms"}}{\text{"Kilomoles"}}\right];$   $p_1 = \text{Quantity}\left[1.7 \cdot 10^3, \text{"Kilopascals"}\right];$   
размерная величина размерная величина

$T_1 = \text{Quantity}\left[180 + 273.15, \text{"Kelvins"}\right];$   
размерная величина

$p_2 = 1.28 \cdot p_1;$

$p_0 = \text{Quantity}\left[100, \text{"Kilopascals"}\right];$   
размерная величина

$v_3 = 1.55 \cdot v_1;$

$T_4 = \text{Quantity}\left[-5 + 273.15, \text{"Kelvins"}\right];$   
размерная величина

In[320]:=

$R_{\text{molar}} = \text{Quantity}\left[8.31447, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilomoles"} \cdot \text{"Kelvins"}}\right];$   
размерная величина

In[321]:=

$$R_1 = \frac{R_{\text{molar}}}{\mu_1}$$

Out[321]=

0.20813232 kJ / (kg K)

In[322]:=

$$R_2 = \frac{R_{\text{molar}}}{\mu_2}$$

Out[322]=

0.188918 kJ / (kg K)

```
In[323]:=
R = ω1 * R1 + ω2 * R2

Out[323]=
0.20140731 kJ / (kg K)
```

## Рассмотрим процесс 1-2 (V-const)

```
In[324]:=
v1 = UnitSimplify[R *  $\frac{T1}{p1}$ ]
      |упростить единицу измерения

Out[324]=
0.053686895 m³/kg

In[325]:=
v2 = v1; T2 =  $\frac{p2}{p1} * T1$ 

Out[325]=
580.032 K

In[326]:=
UnitConvert[T2, "DegreesCelsius"]
      |преобразовать единицы измерений

Out[326]=
306.882 °C

In[327]:=
{p1, v1, T1}

Out[327]=
{ 1700. kPa , 0.053686895 m³/kg , 453.15 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[328]:=
u1Ar = Quantity[141.5,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
      |размерная величина

h1Ar = Quantity[235.8,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
      |размерная величина

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

s01Ar = Quantity[4.094,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms" * "Kelvins"}}$ ];
      |размерная величина
```

In[329]:=

$$s1Ar = s01Ar - s0atZeroLevelAr - R1 * \text{Log}\left[\frac{p1}{p0}\right]$$

Out[329]=

$$-0.32668327 \text{ kJ} / (\text{kg K})$$

Для диоксида углерода(CO2):

In[330]:=

$$u1CO2 = \text{Quantity}\left[269.2, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}\right];$$

$$h1CO2 = \text{Quantity}\left[354.8, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}\right];$$

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

$$s01CO2 = \text{Quantity}\left[5.239, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"} * \text{"Kelvins"}}\right];$$

In[331]:=

In[332]:=

$$s1CO2 = s01CO2 - s0atZeroLevelCO2 - R2 * \text{Log}\left[\frac{p1}{p0}\right]$$

Out[332]=

$$-0.081244992 \text{ kJ} / (\text{kg K})$$

Энтропия смешения смеси:

In[333]:=

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

Out[333]=

$$0.1274839 \text{ kJ} / (\text{kg K})$$

u,h,s смеси в точке 1:

In[334]:=

$$u1 = \omega1 * u1Ar + \omega2 * u1CO2$$

Out[334]=

$$186.195 \text{ kJ} / \text{kg}$$

In[335]:=

$$h1 = \omega1 * h1Ar + \omega2 * h1CO2$$

Out[335]=

$$277.45 \text{ kJ} / \text{kg}$$

```

In[336]:=
s1 =  $\omega_1 * s1Ar + \omega_2 * s1CO2 + \Delta S_{смеш}$ 

Out[336]=
-0.11329597 kJ / (kg K)

In[337]:=
s1Check = ( $\omega_1 * s01Ar + \omega_2 * s01CO2$ ) -
( $\omega_1 * s0atZeroLevelAr + \omega_2 * s0atZeroLevelCO2$ ) - R * Log[ $\frac{p1}{p0}$ ] +  $\Delta S_{смеш}$ )
натуральный логарифм

Out[337]=
-0.11329597 kJ / (kg K)

In[338]:=
sZero = ( $\omega_1 * s0atZeroLevelAr + \omega_2 * s0atZeroLevelCO2$ );

In[339]:=
{u1, h1, s1}

Out[339]=
{ 186.195 kJ/kg , 277.45 kJ/kg , -0.11329597 kJ / (kg K) }

In[340]:=
{p1, v1, T1}

Out[340]=
{ 1700. kPa , 0.053686895 m³/kg , 453.15 K }

```

Найдем значения u,h,s во второй точке цикла. Отдельно по компонентам.  
Для диоксида углерода(CO2):

```

In[341]:=
T2

Out[341]=
580.032 K

In[342]:=
UnitConvert[T2, "DegreesCelsius"]
преобразовать единицы измерений

Out[342]=
306.882 °C

```

Значение температуры не является табличным, поэтому для поиска u2,h2,s2 будем пользоваться линейной интерполяцией. Для сохранения места все приближения функций находится в другом файле.

```

In[343]:=
u2CO2 = Quantity[375.15616, "Kilojoules" / "Kilograms"];
размерная величина
h2CO2 = Quantity[484.73256, "Kilojoules" / "Kilograms"];
размерная величина
s02CO2 = Quantity[5.4913876, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")];
размерная величина

```

Для аргона(Ar):

```
In[344]:=
u2Ar = Quantity[181.0646, "Kilojoules" / "Kilograms"];
      размерная величина
h2Ar = Quantity[301.77864, "Kilojoules" / "Kilograms"];
      размерная величина
s02Ar = Quantity[4.2225056, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")];
      размерная величина

In[345]:=
```

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

```
In[346]:=
u2 = ω1 * u2Ar + ω2 * u2C02

Out[346]=
248.99665 kJ/kg

In[347]:=
h2 = ω1 * h2Ar + ω2 * h2C02

Out[347]=
365.81251 kJ/kg

In[348]:=
s2 = (ω1 * s02Ar + ω2 * s02C02) - sZero - R * Log[ $\frac{p2}{p0}$ ] + ΔSсмеш
      натуральный логарифм

Out[348]=
0.0088489039 kJ / (kg K)

In[349]:=
{u2, h2, s2}

Out[349]=
{ 248.99665 kJ/kg , 365.81251 kJ/kg , 0.0088489039 kJ / (kg K) }

In[350]:=
{p2, v2, T2}

Out[350]=
{ 2176. kPa , 0.053686895 m³/kg , 580.032 K }
```

Рассмотрим процесс 2-3 (T-const)

```
In[351]:=
p3 = p2 *  $\frac{v2}{v3}$ 

Out[351]=
1403.871 kPa

In[352]:=
T3 = T2

Out[352]=
580.032 K
```

```
In[353]:=
{p3, v3, T3}

Out[353]=
{ 1403.871 kPa , 0.083214688 m³/kg , 580.032 K }
```

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

```
In[354]:=
u3 = u2

Out[354]=
248.99665 kJ/kg

In[355]:=
h3 = h2

Out[355]=
365.81251 kJ/kg

In[356]:=
s03Ar = s02Ar

Out[356]=
4.2225056 kJ / (kg K)

In[357]:=
s03C02 = s02C02

Out[357]=
5.4913876 kJ / (kg K)

In[358]:=
s3 = (w1 * s03Ar + w2 * s03C02) - sZero - R * Log[ $\frac{p3}{p0}$ ] + ΔScмеш
                                         |_натуральный логарифм

Out[358]=
0.09711665 kJ / (kg K)

In[359]:=
{u3, h3, s3}

Out[359]=
{ 248.99665 kJ/kg , 365.81251 kJ/kg , 0.09711665 kJ / (kg K) }
```

```
In[360]:=
{p3, v3, T3}

Out[360]=
{ 1403.871 kPa , 0.083214688 m³/kg , 580.032 K }
```

Рассмотрим процесс 3-4 (S-const)

```
In[361]:=
T4

Out[361]=
268.15 K

In[362]:=
UnitConvert[T4, "DegreesCelsius"]
|_преобразовать единицы измерений

Out[362]=
- 5. °C
```

In[363]:=

**s4 = s3**

Out[363]=

0.09711665 kJ / (kg K)

In[364]:=

**s03 = (ω1 \* s03Ar + ω2 \* s03C02)**

Out[364]=

4.6666143 kJ / (kg K)

Найдем s04 каждого компонента смеси:

In[365]:=

$$s04Ar = \text{Quantity}\left[3.821, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"} * \text{"Kelvins"}}\right];$$

размерная величина

$$s04C02 = \text{Quantity}\left[4.769883, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"} * \text{"Kelvins"}}\right];$$

размерная величина

In[366]:=

**s04 = ω1 \* s04Ar + ω2 \* s04C02**

Out[366]=

4.1531091 kJ / (kg K)

In[367]:=

$$p4 = p3 * \text{Exp}\left[\frac{s04 - s03}{R}\right]$$

показательная фун

Out[367]=

109.66198 kPa

In[368]:=

$$v4 = \text{UnitSimplify}\left[R * \frac{T4}{p4}\right]$$

упростить единицу измерения

Out[368]=

0.49248948 m<sup>3</sup>/kg

In[369]:=

**{p4, v4, T4}**

Out[369]=

$$\{109.66198 \text{ kPa}, 0.49248948 \text{ m}^3/\text{kg}, 268.15 \text{ K}\}$$

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[370]:=

**T4**

Out[370]=

268.15 K



```
In[371]:= UnitConvert[T4, "DegreesCelsius"]
           |преобразовать единицы измерений
```

```
Out[371]= - 5. °C
```

```
In[372]:= u4C02 = Quantity[137.3,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
           |размерная величина
           h4C02 = Quantity[188,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
           |размерная величина
           u4Ar = Quantity[83.7,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
           |размерная величина
           h4Ar = Quantity[139.5,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}$ ];
           |размерная величина
```

```
In[373]:= u4 =  $\omega_1 * u4Ar + \omega_2 * u4C02$ 
```

```
Out[373]= 102.46 kJ / kg
```

```
In[374]:= h4 =  $\omega_1 * h4Ar + \omega_2 * h4C02$ 
```

```
Out[374]= 156.475 kJ / kg
```

```
In[375]:= s4
```

```
Out[375]= 0.09711665 kJ / (kg K)
```

```
In[376]:= {u4, h4, s4}
```

```
Out[376]= { 102.46 kJ / kg , 156.475 kJ / kg , 0.09711665 kJ / (kg K) }
```

```
In[377]:= {p4, v4, T4}
```

```
Out[377]= { 109.66198 kPa , 0.49248948 m³/kg , 268.15 K }
```

Рассмотрим процесс 4-5 (p-const) и одновременно процесс 5-1 (n=1.13)

```
In[378]:= p5 = p4
```

```
Out[378]= 109.66198 kPa
```

v5, T5-неизвестны. Мы можем составить систему из двух уравнений, где первое описывает процесс 4-5 Изобарный (известно v4, T4), а второе описывает процесс 5-1 политропный (известно v1, T1, n). Такая система будет однозначно решаться относительно

параметров {v5,T4}.

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=1.13

In[379]:=

**{v4, T4}**

Out[379]=

**{ 0.49248948 m<sup>3</sup>/kg , 268.15 K }**

In[380]:=

**{v1, T1}**

Out[380]=

**{ 0.053686895 m<sup>3</sup>/kg , 453.15 K }**

In[381]:=

**T5Equation = SolveValues[ $\xi * \left( \frac{\text{QuantityMagnitude}[v_4]}{\text{QuantityMagnitude}[T_4]} * \xi \right)^{1.13-1} =$**

**значения для решения уравнения**

**QuantityMagnitude[T1] \* QuantityMagnitude[v1]<sup>1.13-1</sup>,  $\xi$ ];**

**модуль размерной величины**

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

In[382]:=

**T5 = Quantity[First[T5Equation], "Kelvins"]**

**размерна... первый**

Out[382]=

**330.59337 K**

In[383]:=

**v5 = v4 \*  $\frac{T_5}{T_4}$**

Out[383]=

**0.60717417 m<sup>3</sup>/kg**

In[384]:=

**{p5, v5, T5}**

Out[384]=

**{ 109.66198 kPa , 0.60717417 m<sup>3</sup>/kg , 330.59337 K }**

Найдем значения u,h,s в пятой точке цикла. Учтем, что T5=339.15093 K не является точным узлом справочной таблицы, поэтому воспользуемся линейной интерполяцией по узлам t=65°C и t=70°C. Данные об интерполяционных полиномах в отдельном файле.

**CO2:**

In[385]:=

**T5**

Out[385]=

**330.59337 K**

```

In[386]:=
UnitConvert[T5, "DegreesCelsius"]
|преобразовать единицы измерений
Out[386]=
57.443366 °C

In[387]:=
u5C02 = Quantity[178.26148883233, "Kilojoules" / "Kilograms"]
|размерная величина
Out[387]=
178.26149 kJ/kg

In[388]:=
h5C02 = Quantity[240.701294699712, "Kilojoules" / "Kilograms"]
|размерная величина
Out[388]=
240.70129 kJ/kg

In[389]:=
s05C02 = Quantity[4.9463527514177, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")]
|размерная величина
Out[389]=
4.9463528 kJ / (kg K)

```

Ar:

```

In[390]:=
u5Ar = Quantity[103.18187709757, "Kilojoules" / "Kilograms"]
|размерная величина
Out[390]=
103.18188 kJ/kg

In[391]:=
h5Ar = Quantity[171.970550283547, "Kilojoules" / "Kilograms"]
|размерная величина
Out[391]=
171.97055 kJ/kg

In[392]:=
s05Ar = Quantity[3.9299093854878, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")]
|размерная величина
Out[392]=
3.9299094 kJ / (kg K)

```

Найдем  $u, h, s$  смеси в точке 5 цикла

```

In[393]:=
u5 = ω1 * u5Ar + ω2 * u5C02
Out[393]=
129.45974 kJ/kg

In[394]:=
h5 = ω1 * h5Ar + ω2 * h5C02
Out[394]=
196.02631 kJ/kg

```

In[395]:=

$$s5 = (\omega_1 * s_{05Ar} + \omega_2 * s_{05CO2}) - s_{Zero} - R * \text{Log}\left[\frac{p5}{p0}\right] + \Delta S_{смеш}$$

[натуральный логарифм]

Out[395]=

0.22967216 kJ / (kg K)

In[396]:=

{u5, h5, s5}

Out[396]=

{ 129.45974 kJ/kg , 196.02631 kJ/kg , 0.22967216 kJ / (kg K) }

In[397]:=

{p5, v5, T5}

Out[397]=

{ 109.66198 kPa , 0.60717417 m<sup>3</sup>/kg , 330.59337 K }

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

In[398]:=

```

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[399]:=

```

Insert[ReplacePart[Grid[Transpose[{Range[5], p, v, T, u, h, s}]],
  \вписать \заменить часть \таб... \транспозиция \диапазон
  1 → Prepend[First[Insert[Grid[Transpose[{Range[5], p, v, T, u, h, s}]], Frame → True],
    \добавит... \первый \вписать \таб... \транспозиция \диапазон \рамка \истина
    {Dividers → All, Spacings → 1.5 {1, 1}}, 2]],
    \разделители \всё \размер зазора
    {"Точка цикла", "p", "v", "T", "u", "h", "s"}]],
{Dividers → All, Spacings → 1.5 {1, 1}}, 2]
\разделители \всё \размер зазора

```

Out[399]=

Точка цикла	p	v	T	u	h	s
1	1700. kPa	0.05368 \6895 m <sup>3</sup> /kg	453.15 K	186.195 kJ/kg	277.45 kJ/kg	-0.1132 \9597 kJ/( kg K)
2	2176. kPa	0.05368 \6895 m <sup>3</sup> /kg	580.032 K	248.996 \65 kJ/kg	365.812 \51 kJ/kg	0.00884 \89039 kJ/( kg K)
3	1403.871 kPa	0.08321 \4688 m <sup>3</sup> /kg	580.032 K	248.996 \65 kJ/kg	365.812 \51 kJ/kg	0.09711 \665 kJ/( kg K)
4	109.661 \98 kPa	0.49248 \948 m <sup>3</sup> /kg	268.15 K	102.46 kJ/kg	156.475 kJ/kg	0.09711 \665 kJ/( kg K)
5	109.661 \98 kPa	0.60717 \417 m <sup>3</sup> /kg	330.593 \37 K	129.459 \74 kJ/kg	196.026 \31 kJ/kg	0.22967 \216 kJ/( kg K)

In[400]:=

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

Процесс 1-2: V=const

In[401]:=

$$\Delta u_{12} = u_2 - u_1$$

Out[401]=

62.801646 kJ/kg

In[402]:=

$$\Delta h_{12} = h_2 - h_1$$

Out[402]=

$$88.362512 \text{ kJ/kg}$$

In[403]:=

$$\Delta s_{12} = s_2 - s_1$$

Out[403]=

$$0.12214488 \text{ kJ/(kg K)}$$

In[404]:=

$$l_{12} = 0; q_{12} = \Delta u_{12}$$

Out[404]=

$$62.801646 \text{ kJ/kg}$$

In[405]:=

$$T_{12} = \frac{q_{12}}{\Delta s_{12}}$$

Out[405]=

$$514.15702 \text{ K}$$

## Процесс 2-3: T-const

In[406]:=

$$\Delta u_{23} = u_3 - u_2$$

Out[406]=

$$0. \text{ kJ/kg}$$

In[407]:=

$$\Delta h_{23} = h_3 - h_2$$

Out[407]=

$$0. \text{ kJ/kg}$$

In[408]:=

$$\Delta s_{23} = s_3 - s_2$$

Out[408]=

$$0.088267746 \text{ kJ/(kg K)}$$

In[409]:=

$$T_{23} = T_2$$

Out[409]=

$$580.032 \text{ K}$$

In[410]:=

$$q_{23} = T_{23} * \Delta s_{23}$$

Out[410]=

$$51.198117 \text{ kJ/kg}$$

In[411]:=

$$l_{23} = q_{23}$$

Out[411]=

$$51.198117 \text{ kJ/kg}$$

## Процесс 3-4: S-const

In[412]:=

$$\Delta u_{34} = u_4 - u_3$$

Out[412]=

$$-146.53665 \text{ kJ/kg}$$

In[413]:=

$$\Delta h_{34} = h_4 - h_3$$

Out[413]=

$$-209.33751 \text{ kJ/kg}$$

In[414]:=

$$\Delta s_{34} = s_4 - s_3$$

Out[414]=

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

In[415]:=

$$l_{34} = -\Delta u_{34}$$

Out[415]=

$$146.53665 \text{ kJ/kg}$$

In[416]:=

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

Out[416]=

$$0 \text{ kJ/kg}$$

In[417]:=

$$T_{34} = \text{Quantity}\left[0, \text{"Kelvins"}\right]$$

Out[417]=

$$0 \text{ K}$$

## Процесс 4-5: P-const

In[418]:=

$$\Delta u_{45} = u_5 - u_4$$

Out[418]=

$$26.999741 \text{ kJ/kg}$$

In[419]:=

$$\Delta h_{45} = h_5 - h_4$$

Out[419]=

$$39.551311 \text{ kJ/kg}$$

In[420]:=

$$\Delta s_{45} = s_5 - s_4$$

Out[420]=

$$0.13255551 \text{ kJ/ (kg K)}$$

In[421]:=

$$q_{45} = \Delta h_{45}$$

Out[421]=

$$39.551311 \text{ kJ/kg}$$

In[422]:=

$$\mathbf{145 = q_{45} - \Delta u_{45}}$$

Out[422]=

$$12.55157 \text{ kJ/kg}$$

In[423]:=

$$\mathbf{T_{45} = \frac{q_{45}}{\Delta s_{45}}}$$

Out[423]=

$$298.37545 \text{ K}$$

## Процесс 5-1: n=1.13 , n-const

In[424]:=

$$\mathbf{n = 1.13}$$

Out[424]=

$$1.13$$

In[425]:=

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

Out[425]=

$$56.735259 \text{ kJ/kg}$$

In[426]:=

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

Out[426]=

$$81.423689 \text{ kJ/kg}$$

In[427]:=

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

Out[427]=

$$-0.34296814 \text{ kJ / (kg K)}$$

In[428]:=

$$\mathbf{151 = R * \frac{(T_5 - T_1)}{n - 1}}$$

Out[428]=

$$-189.8754 \text{ kJ/kg}$$

In[429]:=

$$\mathbf{q_{51} = 151 + \Delta u_{51}}$$

Out[429]=

$$-133.14014 \text{ kJ/kg}$$

In[430]:=

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

Out[430]=

$$388.19974 \text{ K}$$



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

In[431]:=

```

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[433]:=

```

Magnify[Insert[ReplacePart[
  |увеличить |вписать |заменить часть
  Grid[Transpose[{{12, 23, 34, 45, 51, "Цикл"}, Δu, Δh, Δs, l, q, Tmid}]], 1 → Prepend[
    |таб... |транспозиция |добавить в н:
    First[Grid[Transpose[{{12, 23, 34, 45, 51, "Цикл"}, Δu, Δh, Δs, l, q, Tmid}]]],
    |первый |таб... |транспозиция
    {"Процесс", "Δu", "Δh", "Δs", "l", "q", "Tmid"}]],
  {Dividers → All, Spacings → 1.5 {1, 1}}, 2], 0.7]
  |разделители |всё |размер зазора

```

Out[433]=

Процесс	$\Delta u$	$\Delta h$	$\Delta s$	$l$	$q$	$T_{mid}$
12	62.801646 kJ/kg	88.362512 kJ/kg	0.12214488 kJ/(kg K)	0	62.801646 kJ/kg	514.15702 K
23	0. kJ/kg	0. kJ/kg	0.088267746 kJ/(kg K)	51.198117 kJ/kg	51.198117 kJ/kg	580.032 K
34	-146.53665 kJ/kg	-209.33751 kJ/kg	0. kJ/(kg K)	146.53665 kJ/kg	0 kJ/kg	0 K
45	26.999741 kJ/kg	39.551311 kJ/kg	0.13255551 kJ/(kg K)	12.55157 kJ/kg	39.551311 kJ/kg	298.37545 K
51	56.735259 kJ/kg	81.423689 kJ/kg	-0.34296814 kJ/(kg K)	-189.8754 kJ/kg	-133.14014 kJ/kg	388.19974 K
Цикл	0. kJ/kg	0. kJ/kg	0. kJ/(kg K)	22.110546 kJ/kg	22.110546 kJ/kg	{ 381.01895 K , 442.51829 K }

## Полный цикл

In[434]:=

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

Out[434]=

0. kJ/kg

In[435]:=

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

Out[435]=

0. kJ/kg

In[436]:=

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

Out[436]=

0. kJ/(kg K)

In[437]:=

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

Out[437]=

$$20.410934 \text{ kJ/kg}$$

In[438]:=

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

Out[438]=

$$20.410934 \text{ kJ/kg}$$

In[439]:=

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

Out[439]=

$$153.55107 \text{ kJ/kg}$$

In[440]:=

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

Out[440]=

$$0.34296814 \text{ kJ / (kg K)}$$

### Температура при подводе тепла:

In[441]:=

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

Out[441]=

$$447.71236 \text{ K}$$

In[442]:=

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

Out[442]=

$$-133.14014 \text{ kJ/kg}$$

In[443]:=

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

Out[443]=

$$-0.34296814 \text{ kJ / (kg K)}$$

### Температура при отводе тепла:

In[444]:=

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

Out[444]=

$$388.19974 \text{ K}$$

### Термический КПД цикла:

In[445]:=

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

Out[445]=

$$0.13292603$$

In[446]:=

**T**

Out[446]=

 $\{ 453.15 \text{ K} , 580.032 \text{ K} , 580.032 \text{ K} , 268.15 \text{ K} , 330.59337 \text{ K} \}$ 

In[447]:=

**S**

Out[447]=

 $\{ -0.11329597 \text{ kJ} / (\text{kg K}) , 0.0088489039 \text{ kJ} / (\text{kg K}) , \\ 0.09711665 \text{ kJ} / (\text{kg K}) , 0.09711665 \text{ kJ} / (\text{kg K}) , 0.22967216 \text{ kJ} / (\text{kg K}) \}$ 

In[448]:=

**Ts = Range[Length[T]];**диап... длина

In[449]:=

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

In[450]:=

**Ts**

Out[450]=

 $\{ \{ 453.15 \text{ K} , -0.11329597 \text{ kJ} / (\text{kg K}) \} , \\ \{ 580.032 \text{ K} , 0.0088489039 \text{ kJ} / (\text{kg K}) \} , \{ 580.032 \text{ K} , 0.09711665 \text{ kJ} / (\text{kg K}) \} , \\ \{ 268.15 \text{ K} , 0.09711665 \text{ kJ} / (\text{kg K}) \} , \{ 330.59337 \text{ K} , 0.22967216 \text{ kJ} / (\text{kg K}) \} \}$ 

In[451]:=

**QuantityMagnitude[v]**модуль размерной величины

Out[451]=

 $\{ 0.053686895 , 0.053686895 , 0.083214688 , 0.49248948 , 0.60717417 \}$ 

In[452]:=

**QuantityMagnitude[p]**модуль размерной величины

Out[452]=

 $\{ 1700. , 2176. , 1403.871 , 109.66198 , 109.66198 \}$ 

In[453]:=

**QuantityMagnitude[Ts]**модуль размерной величины

Out[453]=

 $\{ \{ 453.15 , -0.11329597 \} , \{ 580.032 , 0.0088489039 \} , \\ \{ 580.032 , 0.09711665 \} , \{ 268.15 , 0.09711665 \} , \{ 330.59337 , 0.22967216 \} \}$