

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)CO₂, $\mu_2=44.011$

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[757]:=

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

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

$x_2 = 1 - x_1;$

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

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

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

$p_2 = 1.28 \cdot p_1;$

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

$v_3 = 1.55 \cdot v_1;$

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

In[758]:=

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

In[759]:=

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

Out[759]=

0.20813232 kJ / (kg K)

In[760]:=

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

Out[760]=

0.188918 kJ / (kg K)

```
In[761]:=
R =  $\omega_1 * R_1 + \omega_2 * R_2$ 
Out[761]=
0.20140731 kJ / (kg K)
```

Рассмотрим процесс 1-2 (V-const)

```
In[762]:=
v1 = UnitSimplify[R *  $\frac{T_1}{p_1}$ ]
      ↳ упростить единицу измерения
Out[762]=
0.053686895 m³/kg

In[763]:=
v2 = v1; T2 =  $\frac{p_2}{p_1} * T_1$ 
Out[763]=
580.032 K

In[764]:=
UnitConvert[T2, "DegreesCelsius"]
      ↳ преобразовать единицы измерений
Out[764]=
306.882 °C

In[765]:=
{p1, v1, T1}
Out[765]=
{ 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 h_{1Ar}
Для аргона(Ar):

```
In[766]:=
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[767]:=

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

[натуральный]

Out[767]=

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

Для диоксида углерода(CO2):

In[768]:=

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

[размерная величина]

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

[размерная величина]

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

[размерная величина]

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

[размерная величина]

In[769]:=

In[770]:=

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

[натуральный]

Out[770]=

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

Энтропия смешения смеси:

In[771]:=

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

[натуральный] [натуральный]

Out[771]=

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

u,h,s смеси в точке 1:

In[772]:=

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

Out[772]=

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

In[773]:=

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

Out[773]=

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

```

In[774]:=
s1 =  $\omega_1 * s_{1Ar} + \omega_2 * s_{1CO2} + \Delta S_{смеш}$ 

Out[774]=
-0.11329597 kJ / (kg K)

In[775]:=
s1Check = ( $\omega_1 * s_{01Ar} + \omega_2 * s_{01CO2}$ ) -
( $\omega_1 * s_{0atZeroLevelAr} + \omega_2 * s_{0atZeroLevelCO2}$ ) - R * Log[ $\frac{p_1}{p_0}$ ] +  $\Delta S_{смеш}$ 
натуральный логарифм

Out[775]=
-0.11329597 kJ / (kg K)

In[776]:=
sZero = ( $\omega_1 * s_{0atZeroLevelAr} + \omega_2 * s_{0atZeroLevelCO2}$ );

In[777]:=
{u1, h1, s1}

Out[777]=
{ 186.195 kJ/kg , 277.45 kJ/kg , -0.11329597 kJ / (kg K) }

In[778]:=
{p1, v1, T1}

Out[778]=
{ 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[779]:=
T2

Out[779]=
580.032 K

In[780]:=
UnitConvert[T2, "DegreesCelsius"]
преобразовать единицы измерений

Out[780]=
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[781]:=
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[782]:=
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[783]:=
```

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

```
In[784]:=
u2 = ω1 * u2Ar + ω2 * u2C02

Out[784]=
248.99665 kJ / kg

In[785]:=
h2 = ω1 * h2Ar + ω2 * h2C02

Out[785]=
365.81251 kJ / kg

In[786]:=
s2 = (ω1 * s02Ar + ω2 * s02C02) - sZero - R * Log[ $\frac{p2}{p0}$ ] + ΔSсмеш
      натуральный логарифм

Out[786]=
0.0088489039 kJ / (kg K)

In[787]:=
{u2, h2, s2}

Out[787]=
{ 248.99665 kJ / kg , 365.81251 kJ / kg , 0.0088489039 kJ / (kg K) }

In[788]:=
{p2, v2, T2}

Out[788]=
{ 2176. kPa , 0.053686895 m³/kg , 580.032 K }
```

Рассмотрим процесс 2-3 (T-const)

```
In[789]:=
p3 = p2 *  $\frac{v2}{v3}$ 

Out[789]=
1403.871 kPa

In[790]:=
T3 = T2

Out[790]=
580.032 K
```

```
In[791]:=
    {p3, v3, T3}
Out[791]=
    { 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[792]:=
    u3 = u2
Out[792]=
    248.99665 kJ / kg

In[793]:=
    h3 = h2
Out[793]=
    365.81251 kJ / kg

In[794]:=
    s03Ar = s02Ar
Out[794]=
    4.2225056 kJ / (kg K)

In[795]:=
    s03CO2 = s02CO2
Out[795]=
    5.4913876 kJ / (kg K)

In[796]:=
    s3 = (w1 * s03Ar + w2 * s03CO2) - sZero - R * Log[ $\frac{p3}{p0}$ ] + ΔScмеш
Out[796]=
    0.09711665 kJ / (kg K)

In[797]:=
    {u3, h3, s3}
Out[797]=
    { 248.99665 kJ / kg , 365.81251 kJ / kg , 0.09711665 kJ / (kg K) }

In[798]:=
    {p3, v3, T3}
Out[798]=
    { 1403.871 kPa , 0.083214688 m³/kg , 580.032 K }
```

Рассмотрим процесс 3-4 (S-const)

```
In[799]:=
    T4
Out[799]=
    268.15 K
```

```
In[800]:=
UnitConvert[T4, "DegreesCelsius"]
|преобразовать единицы измерений
```

```
Out[800]=
-5. °C
```

```
In[801]:=
s4 = s3
```

```
Out[801]=
0.09711665 kJ / (kg K)
```

```
In[802]:=
s03 = (ω1 * s03Ar + ω2 * s03C02)
```

```
Out[802]=
4.6666143 kJ / (kg K)
```

Найдем s04 каждого компонента смеси:

```
In[803]:=
s04Ar = Quantity[3.821,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms" * "Kelvins"}}$ ];
|размерная величина
s04C02 = Quantity[3.713,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms" * "Kelvins"}}$ ];
|размерная величина
```

```
In[804]:=
s04 = ω1 * s04Ar + ω2 * s04C02
```

```
Out[804]=
3.7832 kJ / (kg K)
```

```
In[805]:=
p4 = p3 * Exp[ $\frac{s04 - s03}{R}$ ]
|показательная фун
```

```
Out[805]=
17.475168 kPa
```

```
In[806]:=
v4 = UnitSimplify[R *  $\frac{T4}{p4}$ ]
|упростить единицу измерен
```

```
Out[806]=
3.0905207 m³/kg
```

```
In[807]:=
{p4, v4, T4}
```

```
Out[807]=
{ 17.475168 kPa , 3.0905207 m³/kg , 268.15 K }
```


Найдем значения u, h, s в четвертой точке цикла. Учтем что при процессе 3-4 $s = \text{const}$, поэтому $s_4 = s_3$. Температура T_4 является узлом справочной таблицы, поэтому обходимся без интерполяции для нахождения u_4, h_4 каждого компонента смеси.

In[808]:=

T4

Out[808]=

268.15 K

In[809]:=

UnitConvert[T4, "DegreesCelsius"]

[преобразовать единицы измерений]

Out[809]=

-5. °C

In[810]:=

$$u_{4CO2} = \text{Quantity}\left[137.3, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}\right];$$

$$h_{4CO2} = \text{Quantity}\left[188, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}\right];$$

$$u_{4Ar} = \text{Quantity}\left[83.7, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}\right];$$

$$h_{4Ar} = \text{Quantity}\left[139.5, \frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"Kilograms"}}\right];$$

In[811]:=

u4 = $\omega_1 * u_{4Ar} + \omega_2 * u_{4CO2}$

Out[811]=

102.46 kJ/kg

In[812]:=

h4 = $\omega_1 * h_{4Ar} + \omega_2 * h_{4CO2}$

Out[812]=

156.475 kJ/kg

In[813]:=

s4

Out[813]=

0.09711665 kJ / (kg K)

In[814]:=

{u4, h4, s4}

Out[814]=

$$\left\{ 102.46 \text{ kJ/kg} , 156.475 \text{ kJ/kg} , 0.09711665 \text{ kJ / (kg K)} \right\}$$

```
In[815]:=
{p4, v4, T4}
Out[815]=
{ 17.475168 kPa , 3.0905207 m³/kg , 268.15 K }
```

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

```
In[816]:=
p5 = p4
Out[816]=
17.475168 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, T5}.

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[817]:=
{v4, T4}
Out[817]=
{ 3.0905207 m³/kg , 268.15 K }
In[818]:=
{v1, T1}
Out[818]=
{ 0.053686895 m³/kg , 453.15 K }
In[819]:=
T5Equation = SolveValues[ξ * (

$$\frac{0.39438652}{268.15} * \xi$$

)^(1.13-1) == 453.15 * 0.053686895^(1.13-1), ξ];
```

```
In[820]:=
T5 = Quantity[First[T5Equation], "Kelvins"]
Out[820]=
339.15093 K
```

```
In[821]:=
v5 = v4 * T5 / T4
Out[821]=
3.9088308 m³/kg
```

```
In[822]:=
{p5, v5, T5}
Out[822]=
{ 17.475168 kPa , 3.9088308 m³/kg , 339.15093 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 $t=65^{\circ}\text{C}$ и $t=70^{\circ}\text{C}$. Данные об интерполяционных полиномах в отдельном файле.

CO₂:

```
In[823]:=
T5

Out[823]=
339.15093 K

In[824]:=
UnitConvert[T5, "DegreesCelsius"]
|преобразовать единицы измерений

Out[824]=
66.000933 °C

In[825]:=
u5CO2 = Quantity[184.2006528, "Kilojoules" / "Kilograms"]
|размерная величина

Out[825]=
184.20065 kJ / kg

In[826]:=
h5CO2 = Quantity[248.2808, "Kilojoules" / "Kilograms"]
|размерная величина

Out[826]=
248.2808 kJ / kg

In[827]:=
s05CO2 = Quantity[4.968602, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")]
|размерная величина

Out[827]=
4.968602 kJ / (kg K)
```

Ar:

```
In[828]:=
u5Ar = Quantity[105.90028, "Kilojoules" / "Kilograms"]
|размерная величина

Out[828]=
105.90028 kJ / kg

In[829]:=
h5Ar = Quantity[176.42048, "Kilojoules" / "Kilograms"]
|размерная величина

Out[829]=
176.42048 kJ / kg

In[830]:=
s05Ar = Quantity[3.943401, "Kilojoules" / ("Kelvins" * "Kilograms")]
|размерная величина

Out[830]=
3.943401 kJ / (kg K)
```

Найдем u,h,s смеси в точке 5 цикла

In[831]:=

$$u5 = \omega1 * u5Ar + \omega2 * u5C02$$

Out[831]:=

$$133.30541 \text{ kJ/kg}$$

In[832]:=

$$h5 = \omega1 * h5Ar + \omega2 * h5C02$$

Out[832]:=

$$201.57159 \text{ kJ/kg}$$

In[833]:=

$$s5 = (\omega1 * s05Ar + \omega2 * s05C02) - sZero - R * \text{Log}\left[\frac{p5}{p0}\right] + \Delta S_{\text{смеш}}$$

[натуральный логарифм]

Out[833]:=

$$0.616138 \text{ kJ/(kg K)}$$

In[834]:=

$$\{u5, h5, s5\}$$

Out[834]:=

$$\left\{ 133.30541 \text{ kJ/kg}, 201.57159 \text{ kJ/kg}, 0.616138 \text{ kJ/(kg K)} \right\}$$

In[835]:=

$$\{p5, v5, T5\}$$

Out[835]:=

$$\left\{ 17.475168 \text{ kPa}, 3.9088308 \text{ m}^3/\text{kg}, 339.15093 \text{ K} \right\}$$

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

In[836]:=

$$\begin{aligned} p &= \{p1, p2, p3, p4, p5\}; \\ v &= \{v1, v2, v3, v4, v5\}; \\ T &= \{T1, T2, T3, T4, T5\}; \\ u &= \{u1, u2, u3, u4, u5\}; \\ h &= \{h1, h2, h3, h4, h5\}; \\ s &= \{s1, s2, s3, s4, s5\}; \end{aligned}$$

In[837]:=

```

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[837]=

| Точка цикла | p | v | T | u | h | s |
|----------------|-----------------|-------------------------------------|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| 1 | 1700. kPa | 0.05368 \6895 m ³ /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 ³ /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 ³ /kg | 580.032 K | 248.996 \65 kJ/kg | 365.812 \51 kJ/kg | 0.09711 \665 kJ / (kg K) |
| 4 | 17.4751 \68 kPa | 3.09052 \07 m ³ /kg | 268.15 K | 102.46 kJ/kg | 156.475 kJ/kg | 0.09711 \665 kJ / (kg K) |
| 5 | 17.4751 \68 kPa | 3.90883 \08 m ³ /kg | 339.150 \93 K | 133.305 \41 kJ/kg | 201.571 \59 kJ/kg | 0.616138 kJ / (kg K) |

In[838]:=

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

Процесс 1-2: V-const

In[839]:=

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

Out[839]=

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

In[840]:=

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

Out[840]=

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

In[841]:=

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

Out[841]=

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

In[842]:=

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

Out[842]=

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

In[843]:=

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

Out[843]=

$$514.15702 \text{ K}$$

Процесс 2-3: T-const

In[844]:=

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

Out[844]=

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

In[845]:=

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

Out[845]=

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

In[846]:=

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

Out[846]=

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

In[847]:=

$$T_{23} = T_2$$

Out[847]=

$$580.032 \text{ K}$$

```
In[848]:=
q23 = T23 * Δs23
```

```
Out[848]=
51.198117 kJ/kg
```

```
In[849]:=
l23 = q23
```

```
Out[849]=
51.198117 kJ/kg
```

Процесс 3-4: S-const

```
In[850]:=
Δu34 = u4 - u3
```

```
Out[850]=
-146.53665 kJ/kg
```

```
In[851]:=
Δh34 = h4 - h3
```

```
Out[851]=
-209.33751 kJ/kg
```

```
In[852]:=
Δs34 = s4 - s3
```

```
Out[852]=
0. kJ / (kg K)
```

```
In[853]:=
l34 = - Δu34
```

```
Out[853]=
146.53665 kJ/kg
```

```
In[854]:=
q34 = Quantity[0,  $\frac{\text{"Kilojoules"}}{\text{"kilograms"}}$ ]
|размерная величина
```

```
Out[854]=
0 kJ/kg
```

```
In[855]:=
T34 = Quantity[0, "Kelvins"]
|размерная величина
```

```
Out[855]=
0 K
```

Процесс 4-5: P-const

```
In[856]:=
Δu45 = u5 - u4
```

```
Out[856]=
30.84541 kJ/kg
```

In[857]:=

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

Out[857]=

$$45.096592 \text{ kJ/kg}$$

In[858]:=

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

Out[858]=

$$0.51902135 \text{ kJ / (kg K)}$$

In[859]:=

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

Out[859]=

$$45.096592 \text{ kJ/kg}$$

In[860]:=

$$l_{45} = q_{45} - \Delta u_{45}$$

Out[860]=

$$14.251182 \text{ kJ/kg}$$

In[861]:=

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

Out[861]=

$$86.88774 \text{ K}$$

Процесс 5-1: $n=1.13$, n -const

In[862]:=

$$n = 1.13$$

Out[862]=

$$1.13$$

In[863]:=

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

Out[863]=

$$52.88959 \text{ kJ/kg}$$

In[864]:=

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

Out[864]=

$$75.878408 \text{ kJ/kg}$$

In[865]:=

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

Out[865]=

$$-0.72943397 \text{ kJ / (kg K)}$$

In[866]:=

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

Out[866]=

$$-176.61727 \text{ kJ/kg}$$


```
In[867]:=
q51 = 151 + Δu51
```

```
Out[867]=
-123.72768 kJ/kg
```

```
In[868]:=
T51 =  $\frac{q51}{\Delta s51}$ 
```

```
Out[868]=
169.6215 K
```

Составим таблицу {Δu,Δh,Δs,l,q,T̄}

```
In[869]:=
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[892]:=
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 на
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[892]=

| Процесс | Δu | Δh | Δs | l | q | Tmid |
|---------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|------------------|-------------------------------|
| 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 | 30.84541 kJ/kg | 45.096592 kJ/kg | 0.51902135 kJ/(kg K) | 14.251182 kJ/kg | 45.096592 kJ/kg | 86.88774 K |
| 51 | 52.88959 kJ/kg | 75.878408 kJ/kg | -0.72943397 kJ/(kg K) | -176.61727 kJ/kg | -123.72768 kJ/kg | 169.6215 K |
| Цикл | 0. kJ/kg | 0. kJ/kg | 0. kJ/(kg K) | 47.984192 kJ/kg | 47.984192 kJ/kg | { 152.32655 K , 218.10933 K } |

Полный цикл

In[872]:=

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

Out[872]:=

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

In[873]:=

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

Out[873]:=

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

In[874]:=

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

Out[874]:=

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

In[875]:=

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

Out[875]:=

$$35.368673 \text{ kJ / kg}$$

In[876]:=

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

Out[876]:=

$$35.368673 \text{ kJ / kg}$$

In[877]:=

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

Out[877]:=

$$159.09636 \text{ kJ / kg}$$

In[878]:=

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

Out[878]:=

$$0.72943397 \text{ kJ / (kg K)}$$

Температура при подводе тепла:

In[879]:=

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

Out[879]:=

$$218.10933 \text{ K}$$

In[880]:=

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

Out[880]:=

$$-123.72768 \text{ kJ / kg}$$

In[881]:=

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

Out[881]:=

$$-0.72943397 \text{ kJ / (kg K)}$$

Температура при отводе тепла:

In[882]:=

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

Out[882]:=

169.6215 K

Термический КПД цикла:

In[883]:=

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

Out[883]:=

0.22230976

In[884]:=

T

Out[884]:=

{ 453.15 K , 580.032 K , 580.032 K , 268.15 K , 339.15093 K }

In[885]:=

s

Out[885]:=

{ -0.11329597 kJ / (kg K) , 0.0088489039 kJ / (kg K) ,
0.09711665 kJ / (kg K) , 0.09711665 kJ / (kg K) , 0.616138 kJ / (kg K) }

In[886]:=

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

In[887]:=

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

In[888]:=

Ts

Out[888]:=

{ { 453.15 K , -0.11329597 kJ / (kg K) },
{ 580.032 K , 0.0088489039 kJ / (kg K) }, { 580.032 K , 0.09711665 kJ / (kg K) },
{ 268.15 K , 0.09711665 kJ / (kg K) }, { 339.15093 K , 0.616138 kJ / (kg K) } }

In[889]:=

QuantityMagnitude[v]
[модуль размерной величины

Out[889]:=

{0.053686895, 0.053686895, 0.083214688, 3.0905207, 3.9088308}

In[890]:=

QuantityMagnitude[p]
[модуль размерной величины

Out[890]:=

{1700., 2176., 1403.871, 17.475168, 17.475168}

```
In[891]:=
```

```
QuantityMagnitude[Ts]
```

```
модуль размерной величины
```

```
Out[891]=
```

```
{{453.15, -0.11329597}, {580.032, 0.0088489039},  
 {580.032, 0.09711665}, {268.15, 0.09711665}, {339.15093, 0.616138}}
```