

```
In [1]: # Подключение необходимых библиотек и настройка окружения
import CoolProp.CoolProp as CP
import math
import CoolProp
from CoolProp.Plots import PropertyPlot
import matplotlib.pyplot as plt
from CoolProp.Plots.SimpleCycles import StateContainer
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')
import matplotlib.pyplot as plt
plt.rcParams["figure.figsize"] = (8,8) #размер графиков (в дюймах)
```

## Задача 1.

Найти производство энтропии при смешении двух потоков с массовыми расходами  $G_1 = 1 \text{ кг/с}$  и  $G_2 = 4 \text{ кг/с}$ , имеющих температуру  $T_1 = 290 \text{ K}$  и  $T_2 = 140 \text{ K}$ , а так же одинаковое давление  $p = 10 \text{ МПа}$ . Газ - воздух.

```
In [2]: # Дано
T1 = 290; G1 = 1
T2 = 140; G2 = 4
p = 10 * 10**6 #Па    ** - знак возведения в степень.
```

Определим энтальпии по заданным  $T_1$ ,  $T_2$  и  $p$ , используя функцию PropsSI.

```
In [3]: h1 = CP.PropsSI('H','T',T1,'P',p,'Air') # первый аргумент функции указывает
        # что определить. Второй и четвертый
        h2 = CP.PropsSI('H','T',T2,'P',p,'Air') # заданные параметры. Третий и пятый
        # их значения. Шестой - для какого газа.
        print('h1 = %.2f Дж/кг, h2 = %.2f Дж/кг' % (h1,h2))

h1 = 394496.90 Дж/кг, h2 = 132113.40 Дж/кг
```

Определим параметры выходного потока из условий:

$$G_1 + G_2 = G_3$$

$$G_1 \cdot h_1 + G_2 \cdot h_2 = G_3 \cdot h_3$$

```
In [4]: G3 = G1+G2
        h3 = (G1*h1 + G2*h2 ) / G3
        print('h3 = %.2f Дж/кг' % h3)

h3 = 184590.10 Дж/кг
```

Определим  $T_3$

```
In [5]: T3 = CP.PropsSI('T','H',h3,'P',p,'Air')
        print('T3 = %.2fK' % (T3))

T3 = 158.83K
```

Определим изобарные теплоемкости входных потоков:

$$C_{p1} = \frac{h1 - h3}{T1 - T3}$$

$$C_{p2} = \frac{h2 - h3}{T2 - T3}$$

```
In [6]: Cp1 = (h1-h3) / (T1-T3)
Cp2 = (h2-h3) / (T2-T3)
print('Cp1 = %.2f Дж/(кгК) , Cp2 = %.2f Дж/(кгК)' % (Cp1,Cp2))

Cp1 = 1600.27 Дж/(кгК) , Cp2 = 2786.87 Дж/(кгК)
```

Определим производство энтропии:

$$\Delta S' = G_1 \cdot C_{p1} \cdot \ln\left(\frac{T_3}{T_1}\right) + G_2 \cdot C_{p2} \cdot \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right)$$

```
In [7]: deltaS = G1*Cp1*math.log((T3/T1), math.e) + G2*Cp2*math.log((T3/T2), math.e)
print('deltaS = %.2f Дж/(с*К)' % (deltaS))

deltaS = 443.29 Дж/(с*К)
```

**Ответ:**  $\Delta S' = 443.29 \frac{\text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{К}}$

## Задача 2

Для изотермического сжатия в компрессоре при температуре  $T_1 = 300\text{K}$  от давления  $p_1 = 0,25\text{ МПа}$  до давления  $p_2 = 25\text{ МПа}$  определить работу сжатия и отводимую при этом теплоту. Газ  $N_2$ . Сделать рисунок с изображением площадей, пропорциональных искомым величинам.

```
In [8]: # Дано
T1 = 300
p1 = 0.25 * 10**6 #Па
p2 = 25 * 10**6 #Па
gas = 'Nitrogen'
```

Определим значения энтропий для заданной температуры и давления газа:

```
In [9]: s1 = CP.PropsSI('S','T',T1,'P',p1,gas)
s2 =CP.PropsSI('S','T',T1,'P',p2,gas)
print('s1 = %.2f Дж/кгК, s2 = %.2f Дж/кгК' % (s1,s2))

s1 = 6572.67 Дж/кгК, s2 = 5078.90 Дж/кгК
```

Определим отводимую теплоту:

$$q = T\Delta S = T(s_2 - s_1)$$

```
In [10]: q = T1 * (s2-s1)
print('q = %.2f Дж/кг' % (q))

q = -448130.87 Дж/кг
```

Знак минус говорит о том, что теплота отводится. Определим значения энтальпий для заданных давлений и температуры:

```
In [11]: h1 = CP.PropsSI('H','T',T1,'P',p1,gas)
h2 =CP.PropsSI('H','T',T1,'P',p2,gas)
print('h1 = %.2f Дж/кгК, h2 = %.2f Дж/кгК' % (h1,h2))

h1 = 310865.75 Дж/кгК, h2 = 275242.69 Дж/кгК
```

Определим работу сжатия:

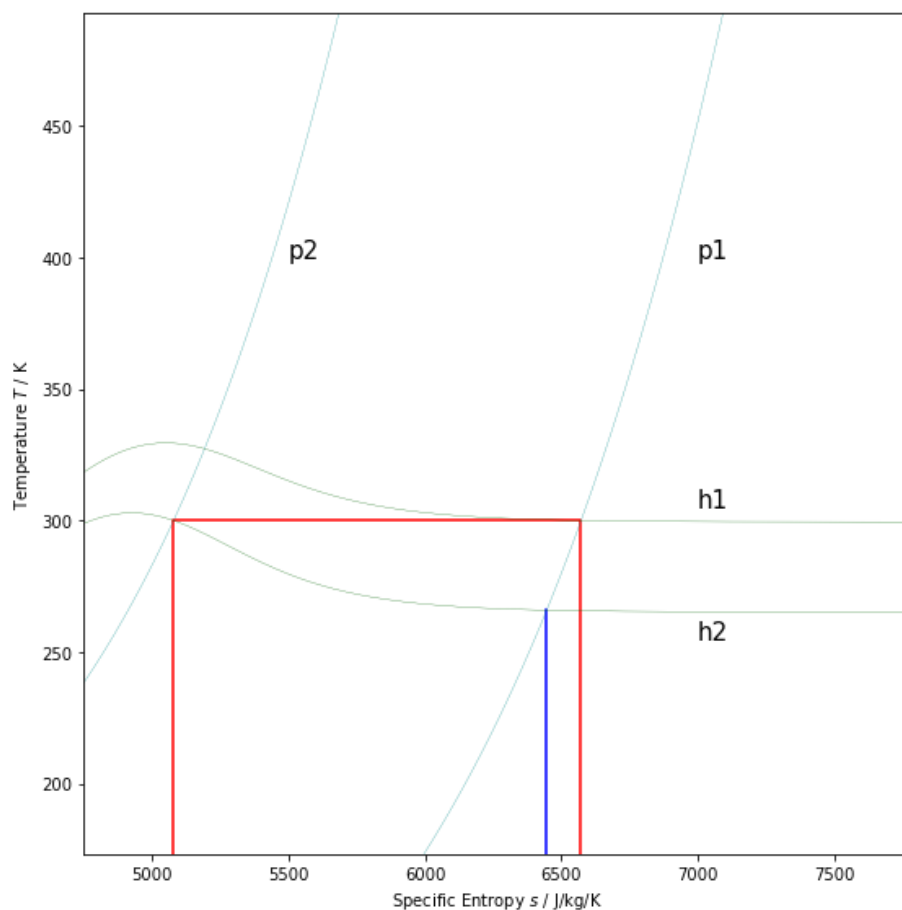
$$l_{\text{сж}} = q + (h_2 - h_1) = T(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)$$

```
In [12]: l = T1*(s1-s2) - (h1-h2)
          print('l = %.2f дж/кг' % (l))
          l = 412507.81 дж/кг
```

```

In [13]: #Построение графика
plot = PropertyPlot(gas, 'ts',unit_system='SI',tp_limits='ACHP') #Полотно TS
#диаграммы в системе СИ
plot.calc_isolines(CoolProp.iP, [p1,p2],2) #Расчет изолиний(изобар), в преде
лах от p1 до p2 , в количестве двух штук
plot.calc_isolines(CoolProp.iHmass, [h1,h2], 2) #расчет изохнтальп, в предел
ах от h1 до h2, в количестве двух штук
q_pl = StateContainer() #контейнер состояний(для отображения теплоты)
q_pl[2,'T'] = T1 # перечисление значений. (прим. для точки 2 значение T рав
но T1)
q_pl[2,'S'] = s2
q_pl[3,'S'] = s2
q_pl[3,'T'] = 0
q_pl[1,'T'] = T1
q_pl[1,'S'] = s1
q_pl[0,'S'] = s1
q_pl[0,'T'] = 0
plot.draw_process(q_pl) # рисует процесс. (красная линия - площадь равная те
плоте)
_s = CP.PropsSI('S','H',h2,'P',p1,gas) #s в точке пересечения h2,p1
_t = CP.PropsSI('T','H',h2,'P', p1, gas) # T в точке пересечения h2,p1
l_p = StateContainer()
l_p[0,'T'] = 0;
l_p[0,'S'] = _s
l_p[1,'S'] = _s
l_p[1,'T'] = _t
plot.draw_process(l_p, line_opts={'color':'blue', 'lw':1.5})
ax = plot.axis
ax.text(7000, 400, 'p1', fontsize=15) #подпись p1 (первые два параметра - ко
ординаты на графике)
ax.text(5500,400,'p2',fontsize = 15)
ax.text(7000,305,'h1',fontsize = 15)
ax.text(7000,255,'h2',fontsize = 15)
plot.show() # отображает плот.

```



\*Теплота - площадь обведенная красной рамкой.

Площадь под изобарой  $p_1$  (криволинейная трапеция ограниченная синей линией) - разность энтальпий

Работа - Площадь красной - плозадь синий.

## Задача 3

Определить минимальную работу при охлаждении от температуры  $T_1 = 290K$  до температуры  $T_2 = 250K$  при изобарическом и изохорическом процессах, если известно давление  $p_1 = 0.2$  МПа в начале процесса охлаждения. Температуру окружающей среды принять равной 300K. Сделать рисунок с изображением площадей пропорциональны искомым величинам. Газ -  $N_2$

```
In [14]: #Дано
T1 = 290; T2 = 250; T_os = 300
P1 = 0.2 * 10**6 #Па
gas = 'Nitrogen'
```

### Изобарный процесс

Для изобарического процесса определим по заданным температурам и давлению энтропии и энтальпию:

```
In [15]: s1 = CP.PropsSI('S', 'P', P1, 'T', T1, gas)
s2 = CP.PropsSI('S', 'P', P1, 'T', T2, gas)
print('s1 = %.2f Дж/кгK, s2 = %.2f Дж/кгK' % (s1, s2))

h1 = CP.PropsSI('H', 'P', P1, 'T', T1, gas)
h2 = CP.PropsSI('H', 'P', P1, 'T', T2, gas)
print('h1 = %.2f Дж/кг, h2 = %.2f Дж/кг' % (h1, h2))

s1 = 6603.88 Дж/кгK, s2 = 6448.99 Дж/кгK
h1 = 300545.81 Дж/кг, h2 = 258803.60 Дж/кг
```

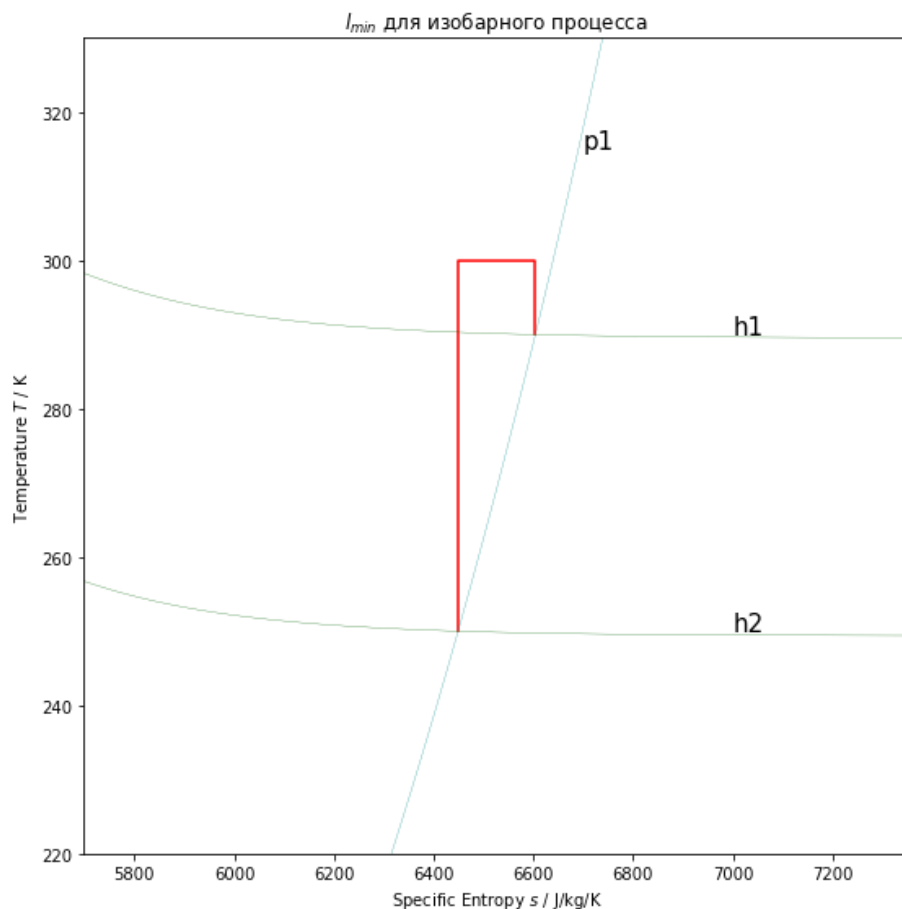
Определим минимальную работу:

$$l_{min} = T_{oc} \cdot (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)$$

```
In [16]: l_min = T_os*(s1-s2) - (h1-h2)
print('l_min = %.2f Дж/кг' % (l_min))

l_min = 4723.77 Дж/кг
```

```
In [17]: plot = PropertyPlot(gas, 'ts', unit_system='SI', tp_limits='ACHP')
plot.calc_isolines(CoolProp.iP, [P1], 1)
plot.calc_isolines(CoolProp.iHmass, [h1, h2], 2)
l_pl = StateContainer()
l_pl[0, 'T'] = T1
l_pl[0, 'S'] = s1
l_pl[1, 'T'] = T_os
l_pl[1, 'S'] = s1
l_pl[2, 'T'] = T_os
l_pl[2, 'S'] = s2
l_pl[3, 'T'] = T2
l_pl[3, 'S'] = s2
plot.draw_process(l_pl) # рисует процесс. (красная линия - площадь равная l_min)
plot.set_axis_limits([s2-750, s1+750, T2-30, T_os+30]) # задает пределы плота [
x1, x2, y1, y2]
plot.title(r'$l_{\min}$ для изобарного процесса')
ax = plot.axis
ax.text(6700, 315, 'p1', fontsize=15) #подпись p1 (первые два параметра - ко
ординаты на графике)
ax.text(7000, 290, 'h1', fontsize = 15)
ax.text(7000, 250, 'h2', fontsize = 15)
plot.show() # отображает плот.
```



### Изохорный процесс:

$h_1 = 300545.81 \text{ Дж/кг}$   $s_1 = 6603.88 \text{ Дж/кгК}$  (см. изобарный процесс) Определим величину удельного объема ( $v = \frac{1}{\rho}$ )

```
In [18]: D1 = CP.PropsSI('D', 'H', h1, 'S', s1, gas) #D - density - плотность
v1 = 1/D1
print('v1 = %.2f м^3/кг' % v1)

v1 = 0.43 м^3/кг
```

По вычисленному значению плотности определим значение энтальпии и энтропии в конце процесса:

```
In [19]: h_2 = CP.PropsSI('H', 'D', D1, 'T', T2, gas)
print("h2 = %.2f Дж/кг" % h2)
s_2 = CP.PropsSI('S', 'D', D1, 'T', T2, gas)
print("s2 = %.2f Дж/кгK" % s2)

h2 = 258803.60 Дж/кг
s2 = 6448.99 Дж/кгK
```

Определим давление  $p_2$ ,  $v_2 = v_1$  (т.к. изохорный процесс),

```
In [20]: P2 = CP.PropsSI('P', 'H', h_2, 'S', s_2, gas)
print('p_2 = %.2f Па' % P2)
D2 = CP.PropsSI('D', 'H', h_2, 'S', s_2, gas)
v2 = 1/D2

p_2 = 172272.29 Па
```

Определим  $u_1$ ,  $u_2$  по формулам:

$$u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1$$

$$u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2$$

А так же проверим данное значение функцией PropsSI (по известным  $h_1, s_1; h_2, s_2$ )

```
In [21]: u1 = h1 - P1*v1
u2 = h_2 - P2*v2
print('u1 = %.2f Дж/кг; u2 = %.2f Дж/кг' % (u1, u2))
u_1 = CP.PropsSI('U', 'H', h1, 'S', s1, gas)
u_2 = CP.PropsSI('U', 'H', h_2, 'S', s2, gas)
print('u_1 = %.2f Дж/кг; u_2 = %.2f Дж/кг' % (u_1, u_2))

u1 = 214518.58 Дж/кг; u2 = 184792.17 Дж/кг
u_1 = 214518.58 Дж/кг; u_2 = 184782.63 Дж/кг
```

Определим минимальную работу:

$$l_{min} = l_K - l_{дет}$$

$$l_K = T_0 \cdot (s_1 - s_2)$$

$$l_{дет} = u_1 - u_2$$

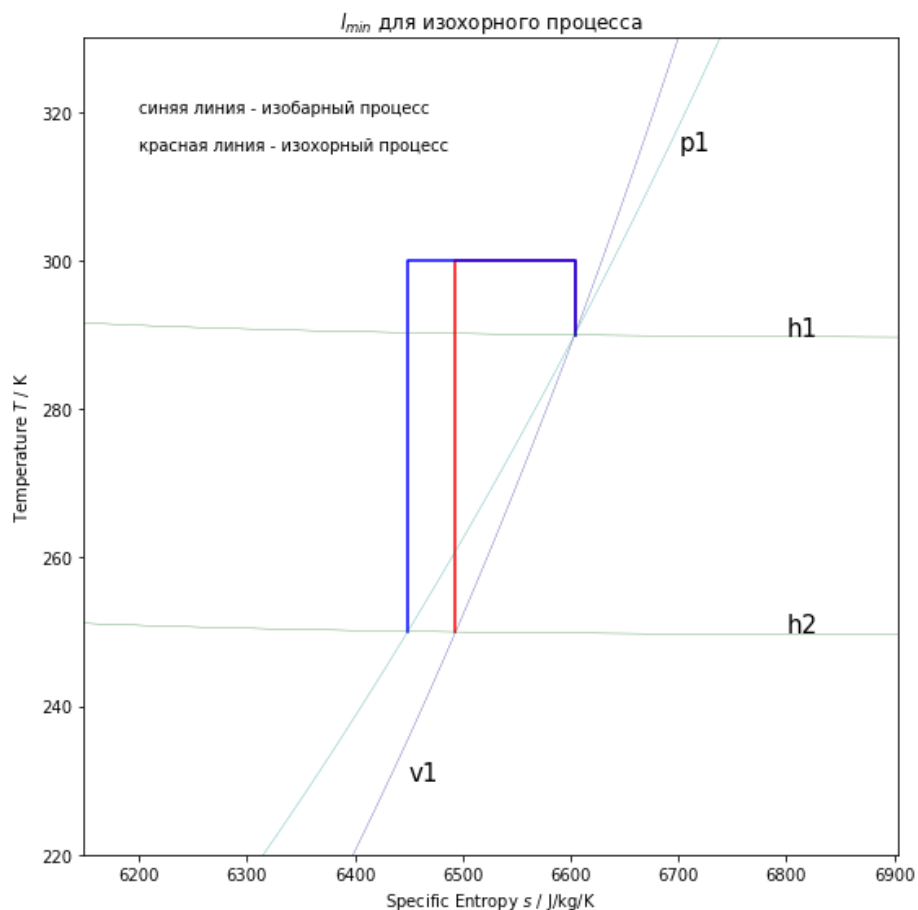
```
In [22]: l_min_v = T_os*(s1-s_2) - (u1-u2)
print('l_min = %.2f Дж/кг' % l_min_v)

l_min = 3363.43 Дж/кг
```

```

In [23]: plot = PropertyPlot(gas, 'ts', unit_system='SI', tp_limits='ACHP')
plot.calc_isolines(CoolProp.iDmass, [D1], 1)
plot.calc_isolines(CoolProp.iP, [P1], 1)
plot.calc_isolines(CoolProp.iHmass, [h1, h2], 2)
l_pl_v = StateContainer()
l_pl_v[0, 'T'] = T1
l_pl_v[0, 'S'] = s1
l_pl_v[1, 'T'] = T_os
l_pl_v[1, 'S'] = s1
l_pl_v[2, 'T'] = T_os
l_pl_v[2, 'S'] = s_2
l_pl_v[3, 'T'] = T2
l_pl_v[3, 'S'] = s_2
plot.draw_process(l_pl_v) # рисует процесс. (красная линия - площадь равная
l_min)
plot.draw_process(l_pl, line_opts={'color': 'blue', 'lw': 1.5}) # изобарный пр
оцесс
plot.set_axis_limits([s2-300, s1+300, T2-30, T_os+30]) # задает пределы плота [
x1, x2, y1, y2]
plot.title(r'$l_{min}$ для изохорного процесса')
ax = plot.axis
ax.text(6450, 230, 'v1', fontsize=15) #подпись v1 (первые два параметра - ко
ординаты на графике)
ax.text(6700, 315, 'p1', fontsize=15) #подпись p1 (первые два параметра - ко
ординаты на графике)
ax.text(6800, 290, 'h1', fontsize = 15)
ax.text(6800, 250, 'h2', fontsize = 15)
ax.text(6200, 320, "синяя линия - изобарный процесс", fontsize = 10)
ax.text(6200, 315, "красная линия - изохорный процесс", fontsize = 10)
plot.show() # отображает плот.

```





Ответ:

Минимальная работа в изобарном процессе :  $l_{min} = 4723.77 \text{ Дж/кг}$

Минимальная работа в изохорном процессе :  $l_{min} = 3363.43 \text{ Дж/кг}$

## Задача 4

Найти температуры потоков на выходе из противоточного теплообменника, если на входе: первый поток имеет температуру  $T_1 = 300 \text{ К}$ , давление  $P_1 = 0,5 \text{ МПа}$ , массовый расход  $G_1 = 10 \text{ кг/с}$ , второй поток – соответственно  $T_2 = 100 \text{ К}$ ,  $P_2 = 1 \text{ МПа}$  и  $G_2 = 9 \text{ кг/с}$ . Потерями давления и влиянием фонового теплопритока пренебречь, минимальная недорекуперация на одном из концов теплообменника составляет  $5 \text{ К}$ . Поток 1 -  $O_2$ . Поток 2 -  $N_2$

```
In [24]: #Дано
T1 = 300; T2 = 100
gas1 = 'Oxygen'; gas2 = 'Nitrogen'
P1 = 0.5 * 10**6 #Па
P2 = 1 * 10**6 #Па
G1 = 10; G2 = 9
dT = 5 #недорекуперация
```

Определим изобарные теплоемкости  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$

```
In [25]: Cp1 = CP.PropsSI('CPMASS', 'P', P1, 'T', T1, gas1)
Cp2 = CP.PropsSI('CPMASS', 'P', P2, 'T', T2, gas2)
print("Cp1 = %.2f Дж/кгК, Cp2 = %.2f Дж/кгК" % (Cp1, Cp2))

Cp1 = 926.11 Дж/кгК, Cp2 = 2304.75 Дж/кгК
```

Водные эквиваленты:

$$W_1 = C_{p1} \cdot G_1$$
$$W_2 = C_{p2} \cdot G_2$$

```
In [26]: W1 = Cp1*G1; W2 = Cp2*G2
print('W1 = %.2f Дж/(К*с), W2 = %.2f Дж/(К*с)' % (W1, W2))

W1 = 9261.10 Дж/(К*с), W2 = 20742.77 Дж/(К*с)
```

Правило задания недорекуперации для двухпоточного противоточного теплообменника: Если водяной эквивалент прямого потока больше, чем обратного, то недорекуперацию задаём на тёплом конце теплообменника. В данном случае недорекуперация задается на холодном конце теплообменника. ( $W_2 > W_1$ )

$$\text{Тогда: } T_3 = T_2 - \Delta T$$

$$\text{Энергетический баланс: } W_1 \cdot (T_1 - T_3) = W_2 \cdot (T_2 - T_4)$$

$$\text{Откуда } T_4 = T_2 + \frac{W_1}{W_2} \cdot (T_1 - T_3)$$

```
In [27]: T3 = T2 + dT
T4 = T2 + (W1/W2) * (T1 - T3)
print("T3 = %.2f K, T4 = %.2f K" % (T3, T4))

T3 = 105.00 K, T4 = 187.06 K
```

Ответ:

$$T_3 = 105K; T_4 = 187.06K$$

## Задача 5

Определить совершенную удельную работу и температуру в конце изоэнтропного и изоэнтальпного расширений, используя таблицы или диаграммы реальных свойств веществ. Для процесса изоэнтропного расширения также использовать уравнение адиабаты Пуассона для идеального газа. Известно давление в начале  $P_1 = 2,5$  МПа и конце  $P_2 = 0,2$  МПа процесса расширения и диапазон температур для начала процесса расширения  $T_1 = 250..300$  К. Построить графики зависимостей изменения перепада температур и удельной работы в процессах расширения от начальной температуры расширения, используя при этом не менее пяти точек.

Газ -  $N_2$ . Показатель адиабаты  $k=1.4$ . Степень сжатия  $\epsilon = \frac{P_2}{P_1}$

```
In [28]: # Дано
P1 = 2.5 * 10**6 #Па
P2 = 0.2 * 10**6 #Па
gas = 'Nitrogen'
Tlmax = 300
Tlmin = 250
k = 1.4 # Показатель адиабаты для азота
eps = P2/P1 #Степень сжатия
print("eps = ", eps)

eps = 0.08
```

### Изоэнтропный процесс

По уравнению Пуассона вычислим  $T_2$ :

$$T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{\frac{k-1}{k}}$$

```
In [29]: T1 = [x for x in range(Tlmin,Tlmax+10,10)] #Создаем список T1 от минимальног
о до максимального значения с шагом 10
T2 = []
for t in T1: #Перебирает все элементы списка T1 и для каждого выполняет кома
нду:
    T2.append( t * eps**((k-1)/k) ) # добавляет в конец списка значение вн
утри скобок
print('T2 = [', end = ' ')
for t in T2:
    print('%.2f'%t, end = '; ')
print(']')

T2 = [ 121.49; 126.35; 131.21; 136.07; 140.93; 145.79; ]
```

Теперь определим энтальпию в начале и в конце процесса по известным  $T_1, T_2$  и  $P_1, P_2$ .

```
In [30]: h1 = []; h2 = [];
print('h1 = [' , end = ' ')
for t in T1:
    tmp = CP.PropsSI('H', 'P', P1, 'T', t, gas)
    h1.append( tmp )
    print('%.2f'%tmp, end = '; ')
print('] Дж/кг')
print('h2 = [' , end = ' ')
for t2 in T2:
    tmp = CP.PropsSI('H', 'P', P2, 'T', t2, gas)
    h2.append( tmp )
    print('%.2f'%tmp, end = '; ')
print('] Дж/кг')
```

h1 = [ 251492.87; 262502.01; 273452.19; 284352.04; 295208.65; 306027.99; ] Дж/кг  
h2 = [ 123542.22; 128755.56; 133950.51; 139130.02; 144296.40; 149451.57; ] Дж/кг

Работа при изоинтропном расширении:

$$l_s = h_1 - h_2$$

```
In [31]: l_s = []
print('l_s = [' , end = ' ')
for i,j in zip(h1,h2): # i - элемент h1, j - элемент h2.
    l_s.append(i-j)
    print('%.2f' % (i-j), end = '; ')
print('] Дж/кг')
```

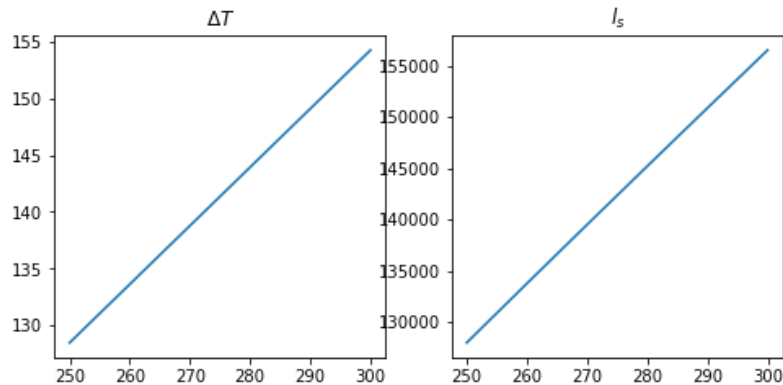
l\_s = [ 127950.66; 133746.45; 139501.68; 145222.02; 150912.25; 156576.43; ] Дж/кг

Изменение температуры  $\Delta T = T_1 - T_2$

```
In [32]: deltaT = []
print('deltaT = [' , end = ' ')
for i,j in zip(T1,T2): # i - элемент T1, j - элемент T2.
    deltaT.append(i-j)
    print('%.2f' % (i-j), end = '; ')
print('] K')
```

deltaT = [ 128.51; 133.65; 138.79; 143.93; 149.07; 154.21; ] K

```
In [33]: plt.subplot(221)
plt.plot(T1, deltaT)
plt.title(r"$\Delta T$")
plt.subplot(222)
plt.plot(T1, l_s)
plt.title(r"$l_s$")
plt.show()
```



### Изоэнтальпный процесс

Энтальпии в начале и в конце процесса равны  $h_1 = h_2$  Определим  $T_2$  по известному давлению  $P_2$  и энтальпии  $h_1$

```
In [34]: h2 = h1
T2 = []
print("T2 = [", end = ' ')
for h in h1:
    tmp = CP.PropsSI('T', 'H', h, 'P', P2, gas)
    T2.append(tmp)
    print("%.2f" % tmp, end = '; ')
print('] K ')
```

```
T2 = [ 243.00; 253.54; 264.03; 274.48; 284.88; 295.26; ] K
```

Найдем значение удельного объема вещества

$$V_1 = 1/\rho_1$$

$$V_2 = 1/\rho_2$$

```
In [35]: V1=[]
print('V1 = [', end=' ')
for h in h1:
    tmp = 1/CP.PropsSI('D', 'H', h, 'P', P1, gas)
    V1.append( tmp )
    print('%.4f'%tmp, end = '; ')
print('] м3/кг')
V2=[]
print('V2 = [', end=' ')
for h in h1:
    tmp = 1/CP.PropsSI('D', 'H', h, 'P', P2, gas)
    V2.append( tmp )
    print('%.4f'%tmp, end = '; ')
print('] м3/кг')
```

```
V1 = [ 0.0292; 0.0304; 0.0317; 0.0330; 0.0342; 0.0355; ] м3/кг
V2 = [ 0.3600; 0.3757; 0.3914; 0.4070; 0.4225; 0.4380; ] м3/кг
```

Работа равна изменению внутренней энергии :

$$l_h = p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2$$

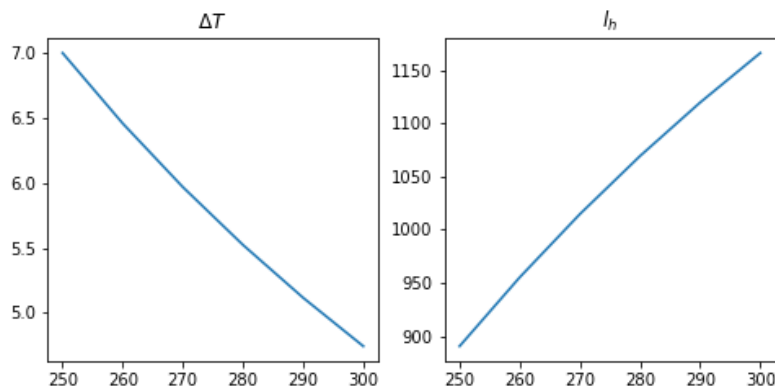
```
In [36]: l_h = []
print('l_h = [', end = ' ')
for i,j in zip(V1,V2):
    tmp = P1*i - P2*j
    l_h.append(tmp)
    print('%.2f'%tmp, end = '; ')
print('] Дж/кг')
```

l\_h = [ 890.56; 955.27; 1014.62; 1069.20; 1119.51; 1166.00; ] Дж/кг

```
In [37]: deltaT = []
print('deltaT = [', end = ' ')
for i,j in zip(T1,T2): # i - элемент T1, j - элемент T2.
    deltaT.append(i-j)
    print('%.2f' % (i-j), end = '; ')
print('] K')
```

deltaT = [ 7.00; 6.46; 5.97; 5.52; 5.12; 4.74; ] K

```
In [38]: plt.subplot(221)
plt.plot(T1, deltaT)
plt.title(r"$\Delta T$")
plt.subplot(222)
plt.plot(T1, l_h)
plt.title(r"$l_h$")
plt.show()
```



## Задача 6

Определить совершенную удельную работу и температуру в конце изэнтропного и изохорного расширения, используя таблицы или диаграммы реальных свойств веществ. Для процесса изэнтропного расширения также использовать уравнение адиабаты Пуассона для идеального газа. Известна температура  $T_1 = 300\text{K}$  в начале процесса расширения, диапазон давлений начала процесса  $P_1 = 0.5..5\text{ МПа}$ . Степень расширения равна 2,5. Построить графики зависимостей изменения перепада температур и удельной работы в процессах расширения от начального давления расширения, используя при этом не менее пяти точек. Газ -  $N_2$

```
In [39]: #Дано
T1 = 300
P1max = 5 * 10**6 #Па
P1min = 5 * 10**5 #Па
gas = 'Nitrogen'
k = 1.4 # показатель адиабаты
eps = 2.5 # коэффициент расширения!
```

## Изоэнтропный процесс

Определим  $T_2$  по уравнению Пуассона:

$$T_2 = T_1 \cdot \epsilon^{\frac{k-1}{k}}$$

```
In [40]: T2 = T1*(1/eps)**((k-1)/k) # 1/eps тк здесь стоит коэффициент сжатия.
print("T2 = %.2f K" % T2)
```

T2 = 230.90 K

Зададим изменение  $P_1$ , вычислим  $P_2 = \frac{P_1}{2.5}$ . По известным  $P_1, P_2$  и  $T_1, T_2$  определим значения энтальпий

```
In [41]: P1 = []
P1 = [x for x in range(P1min,P1max+5*10**5,5*10**5)] # задаем диапазон измен
ия P1
P2 = []
for p in P1:
    P2.append(p/eps) # вычисляем P2
print('P1 = ',P1, 'Па')
print('P2 = ', P2, 'Па')
print(P2)
h1 = []
print('h1 = ', end = '')
for p in P1:
    tmp = CP.PropsSI('H', 'P',p, 'T', T1, gas)
    h1.append(tmp)
    print('%.2f'%tmp, end = ' ')
print(']Дж/кг')
h2 =[]
print('h2 = ', end = '')
for p in P2:
    tmp = CP.PropsSI('H', 'P',p, 'T', T2, gas)
    h2.append(tmp)
    print('%.2f'%tmp, end = ' ')
print(']Дж/кг')
```

```
P1 = [500000, 1000000, 1500000, 2000000, 2500000, 3000000, 3500000, 4000000,
4500000, 5000000] Па
P2 = [200000.0, 400000.0, 600000.0, 800000.0, 1000000.0, 1200000.0, 1400000.
0, 1600000.0, 1800000.0, 2000000.0] Па
[200000.0, 400000.0, 600000.0, 800000.0, 1000000.0, 1200000.0, 1400000.0, 160
0000.0, 1800000.0, 2000000.0]
h1 = [310316.86 309227.29 308149.01 307082.44 306027.99 304986.11 303957.19 3
02941.66 301939.93 300952.38 ]Дж/кг
h2 = [238849.67 238100.58 237351.64 236602.94 235854.55 235106.57 234359.08 2
33612.19 232865.97 232120.54 ]Дж/кг
```

Работа при изоинтропном расширении:

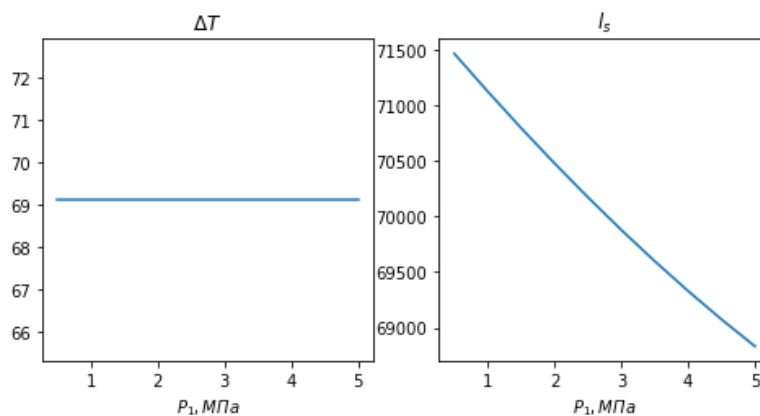
$$l_s = h_1 - h_2$$

Изменение температуры  $\Delta T = T_1 - T_2 = 69.1K$

```
In [42]: l_s = []
print('l_s = [' , end = ' ')
for i,j in zip(h1,h2): # i - элемент h1, j - элемент h2.
    l_s.append(i-j)
    print('%.2f' % (i-j), end = '; ')
print('] Дж/кг')
deltaT = T1 - T2

l_s = [ 71467.19; 71126.71; 70797.37; 70479.50; 70173.45; 69879.54; 69598.11;
69329.48; 69073.96; 68831.84; ] Дж/кг
```

```
In [43]: dt = []
p1 = []
for x in P1:
    p1.append(x/10**6)
for x in range(10):
    dt.append(deltaT)
plt.subplot(221)
plt.plot(p1, dt)
plt.title(r"$\Delta T$")
plt.xlabel(r'$P_1$, МПа$')
plt.subplot(222)
plt.plot(p1, l_s)
plt.xlabel(r'$P_1$, МПа$')
plt.title(r"$l_s$")
plt.show()
```



## Изоэнтальпный процесс

Значения энтальпии  $h_2$  берем из первой части(из изоэнтропного процесса) Затем по известным значениям энтальпии и давления определяем температуру  $T_2$

```
In [44]: h2 = h1
T2=[]
print('T2 = [' , end = '')
for i in range(10):
    tmp = CP.PropsSI('T', 'H', h1[i], 'P', P2[i], gas)
    T2.append(tmp)
    print('%.2f' % tmp, end = ' ')
print(']K')

T2 = [299.37 298.75 298.14 297.55 296.97 296.41 295.85 295.32 294.79 294.29 ]
K
```

Определим удельный объем по известным энтальпиям и давлениям

```
In [45]: V1=[]
for i in range(10):
    V1.append(1/CP.PropsSI('D', 'H',h1[i], 'P', P1[i], gas) )
V2=[]
for i in range(10):
    V2.append(1/CP.PropsSI('D', 'H',h1[i], 'P', P2[i], gas) )
#####
def printList(l, name, razmer):    # функция печатающая список значений...
    print(name+' = [' , end = '')
    for i in l:
        print('%.3f'% i, end=' ')
    print(']' + razmer)
#####
printList(V1, 'V1', 'м3/кг')
printList(V2, 'V2', 'м3/кг')
```

```
V1 = [0.178 0.089 0.059 0.044 0.036 0.030 0.025 0.022 0.020 0.018 ]м3/кг
V2 = [0.444 0.222 0.147 0.110 0.088 0.073 0.063 0.055 0.048 0.044 ]м3/кг
```

Определим работу как изменение внутренней энергии:

$$l_h = p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2$$

```
In [46]: l = []
for i in range(10):
    l.append(P1[i]*V1[i] - P2[i]*V2[i])
printList(l, 'l_h', 'Дж/кг')

l_h = [143.821 293.994 450.462 613.170 782.059 957.073 1138.149 1325.225 1518
.230 1717.091 ]Дж/кг
```

Изменение температуры по формуле Пуассона:

$$\Delta T = T_1 \cdot (1 - \epsilon^{\frac{k-1}{k}})$$

```
In [47]: dT = []
for i in range(10):
    dT.append(T1*(1-0.4**((k-1)/k))
printList(dT, 'deltaT', 'K')

deltaT = [151.469 151.469 151.469 151.469 151.469 151.469 151.469 151.469 151
.469 151.469 ]K
```



```
In [48]: plt.subplot(221)
plt.plot(p1, dT)
plt.title(r"$\Delta T$")
plt.xlabel(r'$P_1$, МПа')
plt.subplot(222)
plt.plot(p1, l)
plt.xlabel(r'$P_1$, МПа')
plt.title(r"$l_h$")
plt.show()
```

