

Задача 2.

Масло марки трансформаторное, протекая через бак с расходом 1 т/ч, нагревается в нём от температуры 25°C до температуры 70°C. Греющим теплоносителем является водяной пар, имеющий начальную степень сухости 0,8, который конденсируется в горизонтальных змеевиках до степени сухости 0,05 при давлении $P = 2250$ мм.рт.ст, смонтированных внутри бака. Для снижения тепловых потерь бак покрыт слоем тепловой изоляции. Требуется определить величину поверхности змеевиков F_1 , m^2 , и расход греющего пара G_1 , кг/с. Для расчёта заданы следующие величины: коэффициент теплоотдачи от пара к внутренней стенке поверхности змеевиков $4 \text{ кВт}/(m^2 \text{ К})$; коэффициент теплоотдачи от наружной стенки поверхности змеевиков к маслу $130 \text{ Вт}/(m^2 \text{ К})$; коэффициент теплоотдачи от масла к стенкам бака $50 \text{ Вт}/(m^2 \text{ К})$; коэффициент теплоотдачи от изоляции бака к воздуху $14 \text{ Вт}/(m^2 \text{ К})$; температура окружающего воздуха 15°C; толщина стенки бака 4 мм; толщина изоляции бака 60 мм; поверхность бака $6 m^2$. Бак изготовлен из стали марки нержавеющая, для тепловой изоляции использован(а) шлак доменный. **Тепловые потери определить как при постоянной теплопроводности изоляции, используя температуру окружающего воздуха, так и с учетом её зависимости от температуры. Сравнить результаты.** Термическим сопротивлением стенки змеевиков пренебречь, изменением внешней поверхности бака из-за его изоляции пренебречь, применить формулы для теплопередачи через плоскую стенку.

Введем исходные данные(про вещества):

Масло МК, теплоноситель- водяной пар, сталь нержавеющая

Расход масла G_2 (kg/s); Температура масла начальная t_{m1} и конечная t_{m2} (°C); начальная и конечная степени сухости водяного пара X_1 и X_2 соответственно; давление в змеевиках P (МПа); коэффициент теплоотдачи от пара к внутренней стенке поверхности змеевиков $\alpha_1(W / m^2 K)$; коэффициент теплоотдачи от наружной стенки поверхности змеевиков к маслу $\alpha_2(W / m^2 K)$; коэффициент теплоотдачи от масла к стенкам бака $\alpha_3(W / m^2 K)$; коэффициент теплоотдачи от изоляции бака к воздуху $\alpha_4(W / m^2 K)$; температура окружающего воздуха $t_{Air}(°C)$; толщина стенки бака $\delta(m)$; толщина изоляции стенки бака $\delta_{Isolation}(m)$; площадь поверхности бака $F_{surf} (m^2)$.

Изоляция- шлак доменный:

Коэффициент теплопроводности изоляции как функция от температуры: $\lambda_{Isolation}(t) = 0.15 + 0.000262 \cdot t (W / m K)$

Коэффициент теплопроводности стали как функция от температуры $\lambda_{Steel} = 14.4 + 0.016t (W / m K)$

```
In[13]:= G2 = 1 / 3.6;
tm1 = 25;
tm2 = 70;
X1 = 0.8;
X2 = 0.05;
P = 0.3;
α1 = 4000;
α2 = 130;
α3 = 50;
α4 = 14;
tAir = 15;
δ = 0.004;
δIsolation = 0.06;
Fsurf = 6;
λIsolation[t_] := 0.15 + 0.000262 * t; λSteel[t_] := 14.4 + 0.016 * t;
```

Найдем удельную теплоемкость $cpm\left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$ масла из значения его средней температуры $tmAverage$ (°C). Воспользуемся таблицей задачника по тепломассообмену Цветкова и Керимова

$$In[15]:= tmAverage = \frac{tm1 + tm2}{2} // N$$

численно

Out[15]=
47.5

In[16]:= cpm = 1825;

Найдем температуру $tVapor$ (°C) и удельную теплоту парообразования водяного пара $r\left(\frac{kJ}{kg}\right)$ при $P=0.333$ МПа. Воспользуемся NIST REFPROP 10.0

	Temperature (K)	Pressure (MPa)	Liquid Density (kg/mi)	Vapor Density (kg/mi)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg-K)	Vapor Entropy (kJ/kg-K)
1	410.27	0.33300	928.69	1.8206	576.80	2729.7	1.7093	6.9568
2								

Отсюда $tVapor$ в градусах Цельсия:

$$In[17]:= tVapor = 410.27 - 273.15$$

Out[17]=
137.12

$r = hVapor - hLiquid$, где h -удельная энтальпия

$$In[18]:= r = 2729.7 - 576.8$$

Out[18]=
2152.9

Найдем тепловой поток создаваемый маслом $Qm(W)$:

$$In[19]:= Qm = G2 * cpm * (tm2 - tm1)$$

Out[19]=
22 812.5

Запишем плотность теплового потока через стенки бака всеми возможными вариантами и найдем температуры стенок и саму плотность теплового потока $q(W/m^2)$

$$q = \frac{tw2 - tw3}{\frac{\delta_{Isolation}}{\lambda_{Isolation}\left(\frac{tw2 + tw3}{2}\right)}} = \frac{tw1 - tw2}{\frac{\delta}{\lambda_{Steel}\left(\frac{tw1 + tw2}{2}\right)}} = \alpha3(tmAverage - tw1) = \alpha4(tw3 - tAir), \text{ где } tw1 - \text{температура 1-ой стенки(}^\circ\text{C)},$$

$tw2$ - второй(°C), $tw3$ - третьей(°C).

$$In[20]:= \{tw1, tw2, tw3, q\} = Last\left[NSolveValues\left[\right.\right.$$

последние значения для численного приближения решения уравнений

$$\left\{q_{BUFFER} = \frac{tw2_{BUFFER} - tw3_{BUFFER}}{\frac{\delta_{Isolation}}{\lambda_{Isolation}\left[\frac{tw2_{BUFFER} + tw3_{BUFFER}}{2}\right]}}, q_{BUFFER} = \frac{tw1_{BUFFER} - tw2_{BUFFER}}{\frac{\delta}{\lambda_{Steel}\left[\frac{tw1_{BUFFER} + tw2_{BUFFER}}{2}\right]}}, q_{BUFFER} = \alpha3 * (tmAverage - tw1_{BUFFER}), \right.$$

$$\left. q_{BUFFER} = \alpha4 * (tw3_{BUFFER} - tAir)\right\}, \{tw1_{BUFFER}, tw2_{BUFFER}, tw3_{BUFFER}, q_{BUFFER}\}, Reals\left.\right]$$

множество действительных чисел

Out[20]=
{46.116672, 46.098395, 19.940459, 69.166419}

Найдем тепловые потери через стенки бака: $Q_{lost}(W)$:

In[21]:= $Q_{lost} = q \cdot F_{surf}$

Out[21]=
414.99851

Найдем тепло которое получается от теплоносителя: $Q_{received}(W)$

In[22]:= $Q_{received} = Q_{lost} + Q_m$

Out[22]=
23 227.499

В избранном процессе(а в теплообменниках он таким и является) удельная теплота получаемая от водяного пара в трубе равна разности энтальпий $q_{Vapor}=h_1-h_2$, где h_1 соответствует энтальпии при степени сухости X_1 , а h_2 степени сухости X_2 .

Через REFPROP находим значение энтальпии влажного пара при $P=0.333\text{MPa}$ liquid enthalpy (kJ/kg)

	Temperature (K)	Pressure (MPa)	Liquid Density (kg/m³)	Vapor Density (kg/m³)	Liquid Enthalpy (kJ/kg)	Vapor Enthalpy (kJ/kg)	Liquid Entropy (kJ/kg·K)	Vapor Entropy (kJ/kg·K)
1	410.27	0.33300	928.69	1.8206	576.80	2729.7	1.7093	6.9568
2								

In[23]:= $h_{OnePrime} = 576.8;$

Энтальпия h_1 (kJ/kg) при степени сухости X_1

In[24]:= $h_1 = h_{OnePrime} + X_1 \cdot r$

Out[24]=
2299.12

Энтальпия h_2 (kJ/kg) при степени сухости X_2

In[25]:= $h_2 = h_{OnePrime} + X_2 \cdot r$

Out[25]=
684.445

Удельная теплота получаемая от водяного пара в трубе $q_{Vapor}(J/kg)$

In[26]:= $q_{Vapor} = (h_1 - h_2) \cdot 10^3$

Out[26]=
 1.614675×10^6

Найдем расход теплоносителя(водяного пара) G_1 (kg/s)

In[27]:= $G_1 = \frac{Q_{received}}{q_{Vapor}}$

Out[27]=
0.014385247

Найдем плотность теплового потока через змеевик $q_{Snake}(W / m^2)$

In[28]:= $q_{Snake} = \frac{(t_{Vapor} - t_{mAverage})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$

Out[28]=
11 283.874

Найдем площадь поверхности змеевика $F_{snake} (m^2)$

```
In[29]:= Fsnake =  $\frac{Q_{received}}{q_{Snake}}$ 
Out[29]= 2.0584684
```

Теперь мы проведем те же самые расчеты, но положим $\lambda_{isolation-const} (W / m^2 K)$, а не как функцию от температуры

```
In[30]:=  $\lambda_{IsolationConst} = \lambda_{Isolation}[0]$ 
Out[30]= 0.15
```

Так же решим систему из четырех уравнений для поиска температур стенок и плотности теплового потока:

```
In[31]:= {tw1Secondary, tw2Secondary, tw3Secondary, qSecondary} =
Last[NSolveValues[{qSecondaryBUFFFER ==  $\frac{tw2SecondaryBUFFFER - tw3SecondaryBUFFFER}{\frac{\delta_{Isolation}}{\lambda_{IsolationConst}}}$ ,
[пос... значения для численного приближения решения уравнений
qSecondaryBUFFFER ==  $\frac{tw1SecondaryBUFFFER - tw2SecondaryBUFFFER}{\frac{\delta}{\lambda_{Steel}[\frac{tw1SecondaryBUFFFER + tw2SecondaryBUFFFER}{2}]}}$ , qSecondaryBUFFFER ==
 $\alpha_3 * (tmAverage - tw1SecondaryBUFFFER)$ , qSecondaryBUFFFER ==  $\alpha_4 * (tw3SecondaryBUFFFER - tAir)$ ,
tw1SecondaryBUFFFER > 0, tw2SecondaryBUFFFER > 0, tw3SecondaryBUFFFER > 0, qSecondaryBUFFFER > 0},
{tw1SecondaryBUFFFER, tw2SecondaryBUFFFER, tw3SecondaryBUFFFER, qSecondaryBUFFFER}, Reals]]
Out[31]= {46.178036, 46.160572, 19.721299, 66.098182}
```

Найдем тепловые потери через стенки бака: $Q_{lostSecondary}(W)$:

```
In[32]:= QlostSecondary = qSecondary * Fsurf
Out[32]= 396.58909
```

Найдем тепло которое получается от теплоносителя: $Q_{receivedSecondary}(W)$

```
In[33]:= QreceivedSecondary = QlostSecondary + Qm
Out[33]= 23 209.089
```

Расход теплоносителя $G1Secondary(kg/s)$:

```
In[34]:= G1Secondary =  $\frac{Q_{receivedSecondary}}{qVapor}$ 
Out[34]= 0.014373846
```

Плотность теплового потока через змеевик $q_{SnakeSecondary} (W / m^2)$

```
In[35]:= qSnakeSecondary =  $\frac{(tVapor - tmAverage)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$ 
Out[35]= 11 283.874
```

Найдем площадь поверхности змеевика $F_{snakeSecondary}$ (m^2)

```
In[36]:= FsnakeSecondary =  $\frac{Q_{receivedSecondary}}{q_{SnakeSecondary}}$ 

Out[36]= 2.0568369
```

Найдем отличия двух способов решения: $\lambda Isolation - const$ и $\lambda Isolation = f(t)$:

Сравним теплотери через стенки бака,расходы теплоносителя и площади поверхности змеевика и найдем абсолютные/относительные погрешности

```
In[37]:= ΔQlost = Abs [Qlost - QlostSecondary]
           |_абсолютное значение

Out[37]= 18.40942
```

```
In[38]:= δQlost =  $\frac{\Delta Qlost}{Qlost}$ 

Out[38]= 0.044360207
```

```
In[39]:= ΔG1 = Abs [G1 - G1Secondary]
           |_абсолютное значение

Out[39]= 0.000011401316
```

```
In[40]:= ΔG1 =  $\frac{\Delta G1}{G1}$ 

Out[40]= 0.00079257007
```

```
In[41]:= ΔFsnake = Abs [Fsnake - FsnakeSecondary]
           |_абсолютное значение

Out[41]= 0.0016314805
```

```
In[42]:= δF =  $\frac{\Delta Fsnake}{Fsnake}$ 

Out[42]= 0.00079257007
```

Вывод : Отличия существуют, погрешность присутствует, но если нужно сделать расчеты быстро то это пренебрежимо,поэтому функциональной зависимостью $\lambda Isolation(t)$ можно пренебречь и брать коэффициент теплопроводности $\lambda Isolation$ как $const$