

**Задача 1.**

В три стальные трубы ( $d_2 \times \delta = 80 \times 3$  мм), расположенные на открытом воздухе с температурой  $6^\circ\text{C}$  поступает горячая вода при температуре  $200^\circ\text{C}$  и давлении 5 МПа, которая движется со скоростью 12 км/ч. Первая труба покрыта слоем минеральной ваты толщиной 50 мм имеющая коэффициент теплопроводности  $0,045 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . Определить длину трубы если на выходе из нее температура воды уменьшилась на  $40^\circ\text{C}$ . Определить температуры воды на выходе из трубы покрытую слоем бетона толщиной 50 мм имеющая коэффициент теплопроводности  $1,28 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  и из трубы без изоляции если они имеют ту же длину, что и первая труба. Расчет провести с учетом потерь тепла в окружающую среду совместно конвекцией и излучением. Для всех трех труб принять излучательную способность поверхности материала  $\epsilon=0,8$ , коэффициент теплоотдачи  $14,2 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ . Коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней стороне трубы равен  $14,2 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ . Построить графики  $t_{\text{ж}}(x)$ ,  $q_L(x)$ ,  $q_c(x)$  для обеих способов расчета. Сравнить тепловой поток потерь трубопроводов  $Q$  для обеих способов расчета.

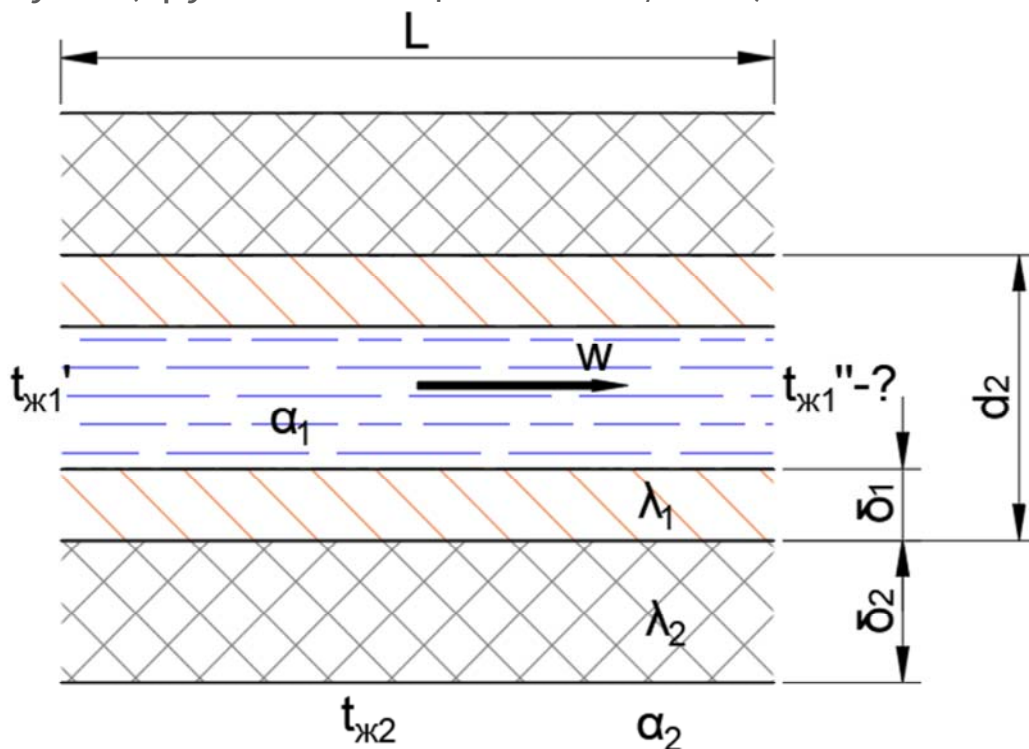
**Указания:**

1. Решить задачу используя формулу Шухова ( $\Delta t_x = \Delta t_0 e^{-kmF_x}$ ) и по алгоритму решения задачи 3 гл. 2 учебника [1].
2. Свойства воды выбирать при средней температуре воды.
3. Проанализировать результаты с точки зрения эффективности работы изоляции труб.

Литература к задаче 1

1. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2008.

Рисунок(труба с изоляцией бетон/вата)

**Данные из условия:**

$d_2=80(\text{мм}); \delta=4(\text{мм})$  - геометрия труб ;  $t_{\text{Air}}=6 (^\circ\text{C})$ -температура воздуха;  $t_{\text{Liquid}1}=200(^\circ\text{C})$ -температура горячей воды на входе (как  $t_{\text{ж}1}$ ) ;  $p=5(\text{МПа})$ - давление горячей воды;  $w=12(\text{км/ч})$  - скорость течения горячей воды;  
 $\lambda_{\text{MinWool}}=0.045(\text{Вт/м}\cdot\text{К}); \delta_{\text{MinWool}}=50(\text{мм});$   
 $t_{\text{Liquid}2}=200-40=160(^\circ\text{C})$ -температура горячей воды на выходе(как  $t_{\text{ж}2}$ ) ;  $\lambda_{\text{Concrete}}=1.28(\text{Вт/м}\cdot\text{К}); \delta_{\text{Concrete}}=50(\text{мм}); \epsilon=0.8$ -излучательная способность поверхности материала труб;  $\alpha=14.2(\text{Вт/м}^2\cdot\text{К})$ -коэффициент теплоотдачи

```

2 | N°1A3.nb
In[1]:= d2 = 80 * 10-3;
      δ = 4 * 10-3;
      tAir = 6;
      tLiquid1 = 200;
      p = 5 * 106;
      w = 12 / 3.6;
      λMinWool = 0.045;
      δMinWool = 50 * 10-3;
      tLiquid2 = 160;
      λConcrete = 1.28;
      δConcrete = 50 * 10-3;
      ε = 0.8;
      α = 14.2;

```

Сталь берем нержавеющей, ее коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{Steel}}$  (W/m K) берем как const в виду слабой зависимости от температуры:

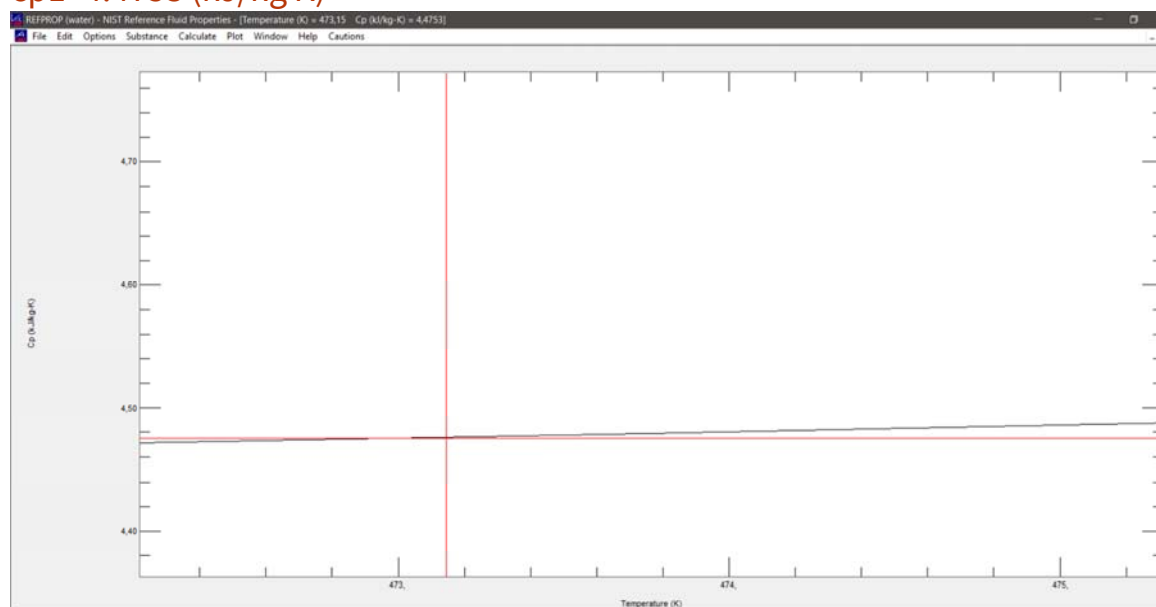
```
In[4]:= λSteel = 14.4 ;
```

Изобарную ( $p=5\text{MPa}$ ) теплоемкость и плотность воды при  $t_{\text{Liquid1}}$  и  $t_{\text{Liquid2}}$  найдем через REFPROP:

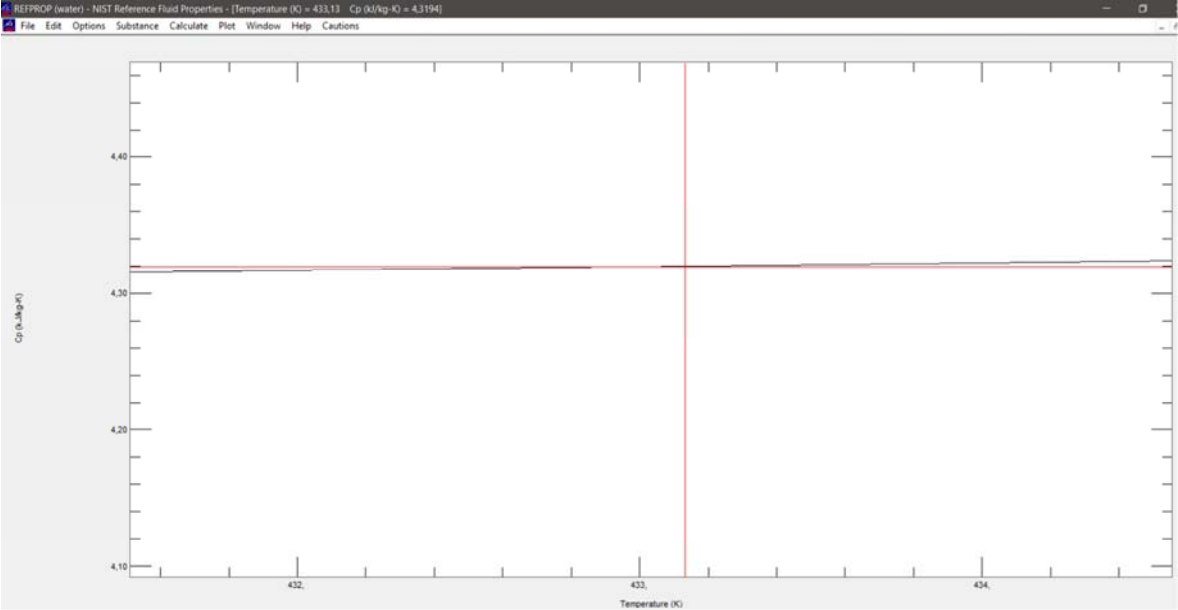
ср:

$t_{\text{Liquid1}}=200$  (°C)

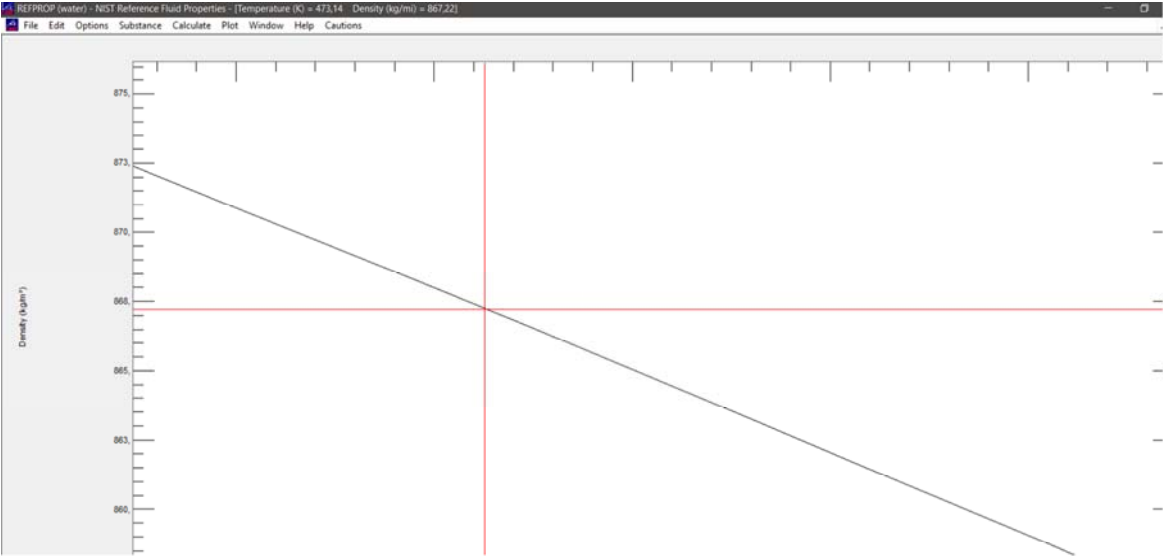
$cp1=4.4753$  (kJ/kg K)



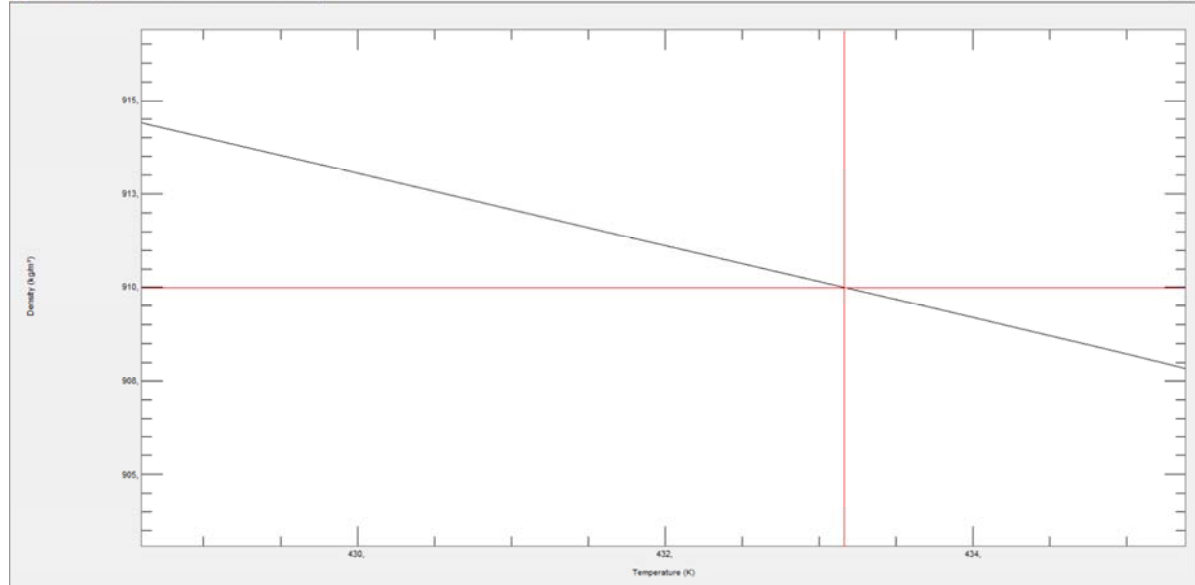
tLiquid2=80 (°C)  
 cp2=4.3194 (kJ/kg K)



ПЛОТНОСТЬ:  
 tLiquid1=200(°C)  
 $\rho_1=867.22 \text{ (kg / m}^3\text{)}$



tLiquid2=160 (°C)  
 $\rho_2=909.99 \text{ (kg / m}^3\text{)}$



ln[5]:= cp1 = 4.4753; cp2 = 4.3194 ; ρ1 = 867.22; ρ2 = 909.99;

## Средняя удельная изобарная теплоемкость $c_{pAverage}$ (kJ/kg K)

$$\text{In}[6]:= \text{cpAverage} = \frac{cp1 + cp2}{2}$$

Out[6]= 4.39735

## Средняя плотность воды $\rho_{Average}$ (kg / m<sup>3</sup>)

$$\text{In}[7]:= \rho_{Average} = \frac{\rho1 + \rho2}{2}$$

Out[7]= 888.605

## Массовый расход воды $G$ (kg/s)

$$\text{In}[8]:= G = \pi * \left( \frac{d2 - 2 * \delta}{2} \right)^2 * w * \rho_{Average}$$

Out[8]= 12.059863

## Найдем диаметры $d1, d3$ (m)

$$\text{In}[9]:= d1 = d2 - 2 * \delta // N$$

численное n

Out[9]= 0.072

$$\text{In}[10]:= d3 = d2 + 2 * \delta // N$$

численное n

Out[10]=

0.088

## Найдем линейный коэффициент теплопередачи для трубы с ватной изоляцией $K_{linearMinWool}$ (W/m K)

$$\text{In}[11]:= K_{linearMinWool} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{Steel}} * \text{Log} \left[ \frac{d2}{d1} \right] + \frac{1}{2 * \lambda_{MinWool}} * \text{Log} \left[ \frac{d3}{d2} \right] + \frac{1}{\alpha * d3}}$$

Out[11]=

0.35198784

## Применяя формулу Шухова найдем расстояние(длину трубы) на котором будет выполняться условие разности температур на входе и выходе в трубу с изоляцией из минеральной ваты:

$$\text{In}[12]:= \text{First} \left[ \text{NSolve} \left[ t_{Liquid2} == t_{Air} + (t_{Liquid1} - t_{Air}) * \text{Exp} \left[ \frac{-K_{linearMinWool}}{G * cp_{Average} * 1000} * \pi * x \right], x \right] \right]$$

первый численное решение уравнений

показательная функция

Out[12]=

{x → 11 073.636}

## Таким образом длина трубы равна 11073.636 m)

$$\text{In}[13]:= L = 11073.6362;$$

## Найдем линейный коэффициент теплопередачи для трубы с бетонной изоляцией $K_{linearConcrete}$ (W/m K)

$$\text{In}[14]:= K_{linearConcrete} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{Steel}} * \text{Log} \left[ \frac{d2}{d1} \right] + \frac{1}{2 * \lambda_{Concrete}} * \text{Log} \left[ \frac{d3}{d2} \right] + \frac{1}{\alpha * d3}}$$

Out[14]=

0.54968137

По формуле Шухова найдем температуру на выходе из трубы с бетонной изоляцией:

```
In[15]:= t[x_, k_] := tAir + (tLiquid1 - tAir) * Exp[
$$\frac{-k}{G * \text{cpAverage} * 1000} * \pi * x$$
]
Out[15]= 141.26892
```

Найдем линейный коэффициент теплопередачи для трубы без изоляции  $K_{\text{linearRaw}}$  (W/m K)

```
In[17]:= KlinearRaw = 
$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{\text{Steel}} * \text{Log}[\frac{d2}{d1}] + \frac{1}{\alpha * d3}}}$$

Out[17]= 0.56116559
```

По формуле Шухова найдем температуру на выходе из трубы без изоляции:

```
In[18]:= t[L, KlinearRaw]
Out[18]= 140.25367
```

Функция теплового потока и плотности теплового потока :

```
In[19]:= Q[x_, k_] := k *  $\pi$  * (t[x, k] - tAir) * x;
qLinear[x_, k_] := k *  $\pi$  * (t[x, k] - tAir);
```

Тепловой поток  $Q(W)$  и его линейная плотность  $q_{\text{Linear}}(W/m)$  для голой трубы:

```
In[21]:= Q[L, KlinearRaw]
Out[21]=  $2.6209415 \times 10^6$ 
In[22]:= qLinear[L, KlinearRaw]
Out[22]= 236.68301
```

Тепловой поток  $Q(W)$  и его линейная плотность  $q_{\text{Linear}}(W/m)$  для трубы с бетонной изоляцией:

```
In[23]:= Q[L, KlinearConcrete]
Out[23]=  $2.5867185 \times 10^6$ 
In[24]:= qLinear[L, KlinearConcrete]
Out[24]= 233.59251
```

Тепловой поток  $Q(W)$  и его линейная плотность  $q_{\text{Linear}}(W/m)$  для трубы с ватной изоляцией:

```
In[25]:= Q[L, KlinearMinWool]
Out[25]=  $1.8857691 \times 10^6$ 
In[26]:= qLinear[L, KlinearMinWool]
Out[26]= 170.29357
```

Произведем расчеты по другому:

```
In[27]:= qLinearAdditional[k_] := k *  $\pi$  * 
$$\left( \frac{t_{\text{Liquid1}} + t_{\text{Liquid2}}}{2} - t_{\text{Air}} \right)$$

```

Запишем баланс энергий:

$$Q = q_{\text{Linear}} * L = G * c_{\text{pAverage}} * (t_{\text{Liquid1}} - t_{\text{Liquid2}}) = \pi$$

$$* \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 * w * c_{\text{pAverage}} * \rho_{\text{Average}} * (t_{\text{Liquid1}} - t_{\text{Liquid2}}), \text{отсюда можно найти } L:$$

In[28]:= **NSolve**[**qLinearAdditional**[**KlinearMinWool**] \* x ==  
численное решение уравнений

$$\pi * \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 * w * c_{\text{pAverage}} * 1000 * \rho_{\text{Average}} * (t_{\text{Liquid1}} - t_{\text{Liquid2}}), x]$$

Out[28]=

{ {x → 11 024.696} }

Таким образом длина трубы по этому способу равна  $L_{\text{additional}}(m)$

In[29]:= **Ladditional** = 11 024.696;

Выразим  $t_{\text{Liquid2}}$  из линейной плотности теплового потока как переменную :

In[30]:= **Solve**[**k** \*  $\pi * \left(\frac{t_{\text{Liquid2asVariable}} + t_{\text{Liquid1}}}{2} - t_{\text{Air}}\right) * x ==$   
решить уравнения

$$\pi * \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 * w * c_{\text{pAverage}} * 1000 * \rho_{\text{Average}} * (t_{\text{Liquid1}} - t_{\text{Liquid2asVariable}}), t_{\text{Liquid2asVariable}}]$$

Out[30]=

$$\left\{ \left\{ t_{\text{Liquid2asVariable}} \rightarrow \frac{1.0606288 \times 10^7 - 295.30971 k x}{53 031.438 + 1.5707963 k x} \right\} \right\}$$

In[31]:= **tLiquid2asVariable**[k\_, x\_] :=  $\frac{1.0606288 * 10^7 - 295.3097 * k * x}{53 031.4383 + 1.570796 * k * x}$

Теперь найдем температуры на выходе из трубы с бетонной изоляцией и трубы без изоляции.

Бетонная изоляция:

In[32]:= **tLiquid2asVariable**[**KlinearConcrete**, **Ladditional**]

Out[32]=

140.953

Голая труба:

In[33]:= **tLiquid2asVariable**[**KlinearRaw**, **Ladditional**]

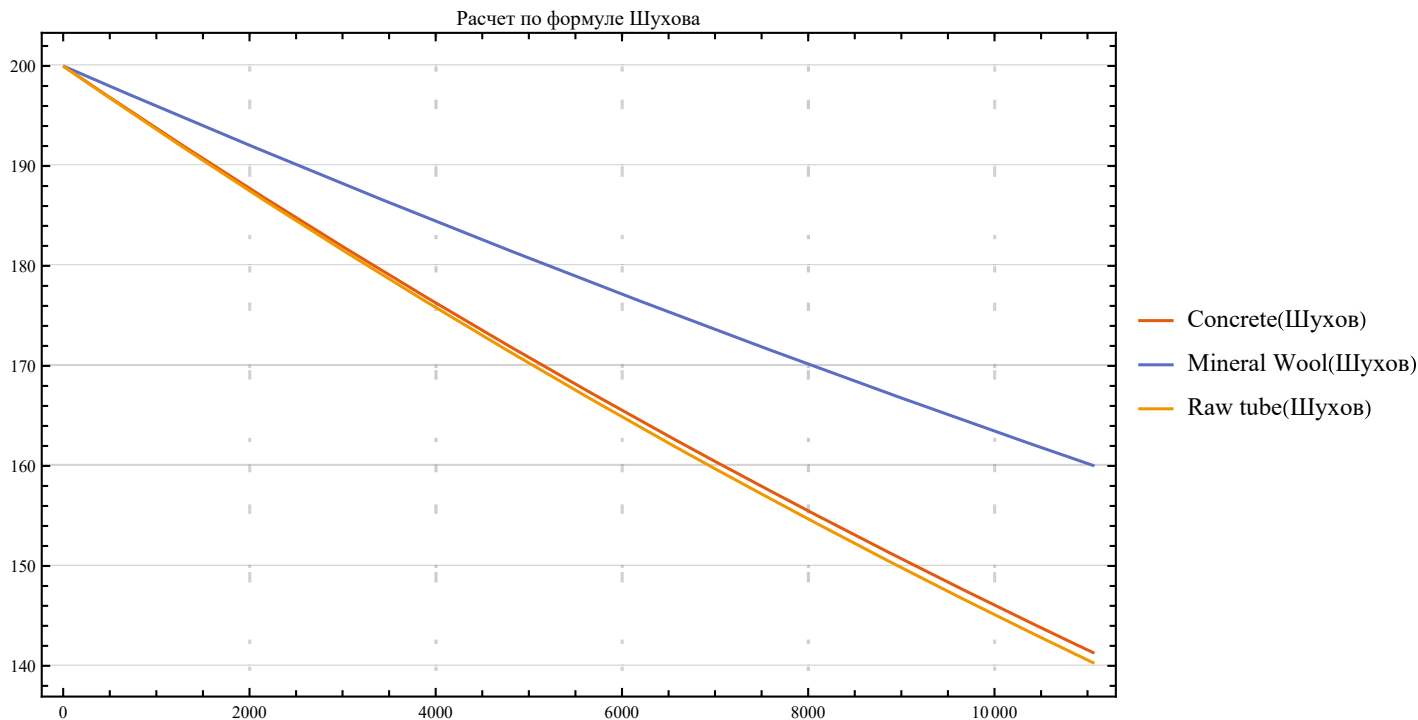
Out[33]=

139.91041

Изобразим функциональные зависимости температуры жидкости в точке  $\chi$ , где  $\chi$ -обобщенное расстояние(длина трубы)

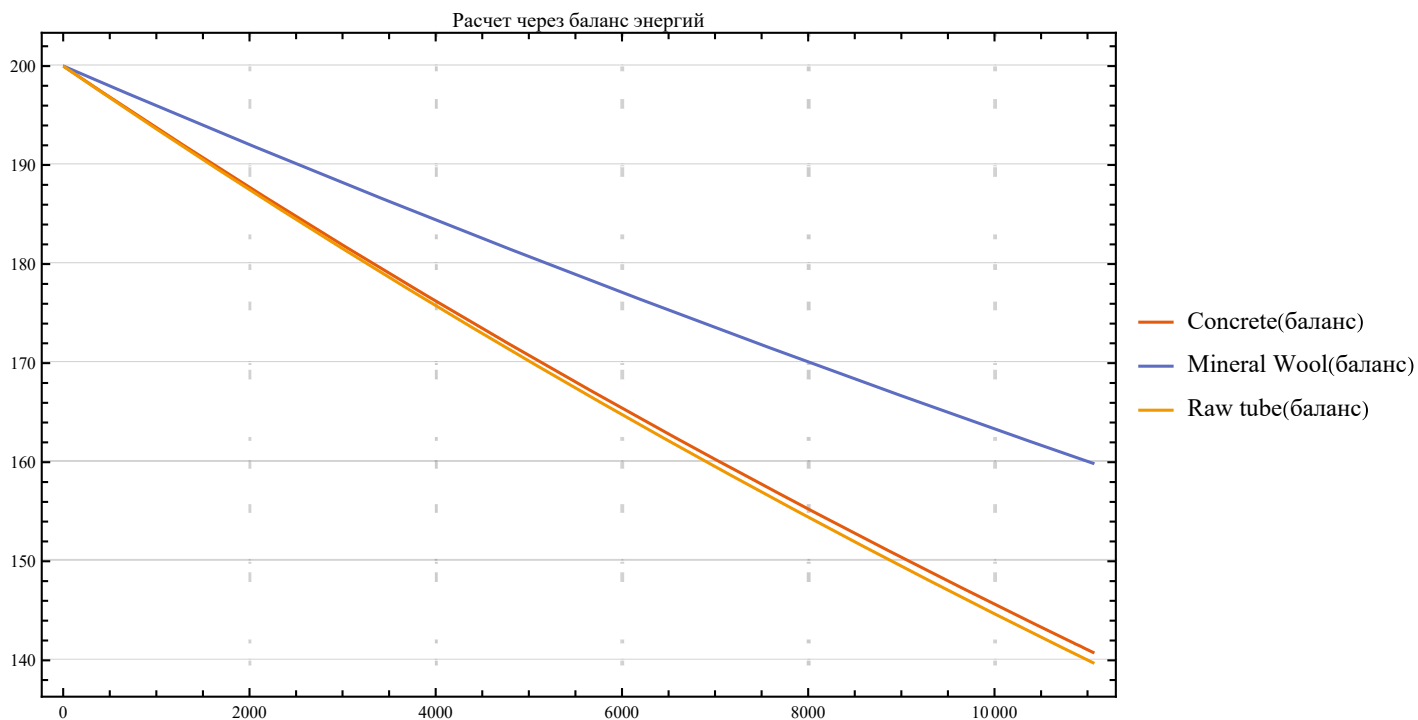
```
In[34]:= Plot[{t[ $\chi$ , KlinearConcrete], t[ $\chi$ , KlinearMinWool], t[ $\chi$ , KlinearRaw]},  
[график функции  
{ $\chi$ , 0, L}, PlotLabel → "Расчет по формуле Шухова", PlotTheme → "Scientific",  
[пометка графика [тематический стиль графика  
PlotLegends → {"Concrete (Шухов)", "Mineral Wool (Шухов)", "Raw tube (Шухов)"},  
[легенды графика  
ImageSize → Large, GridLines → Automatic]  
[размер изоб... [круп... [линии коорд... [автоматический
```

Out[34]=



```
In[35]:= Plot[{tLiquid2asVariable[KlinearConcrete,  $\chi$ ], tLiquid2asVariable[KlinearMinWool,  $\chi$ ],  
[график функции  
tLiquid2asVariable[KlinearRaw,  $\chi$ ]}, { $\chi$ , 0, L}, PlotLabel → "Расчет через баланс энергий",  
[пометка графика  
PlotTheme → "Scientific", PlotLegends → {"Concrete (баланс)", "Mineral Wool (баланс)", "Raw tube (баланс)"},  
[тематический стиль графика [легенды графика  
ImageSize → Large, GridLines → Automatic]  
[размер изоб... [круп... [линии коорд... [автоматический
```

Out[35]=

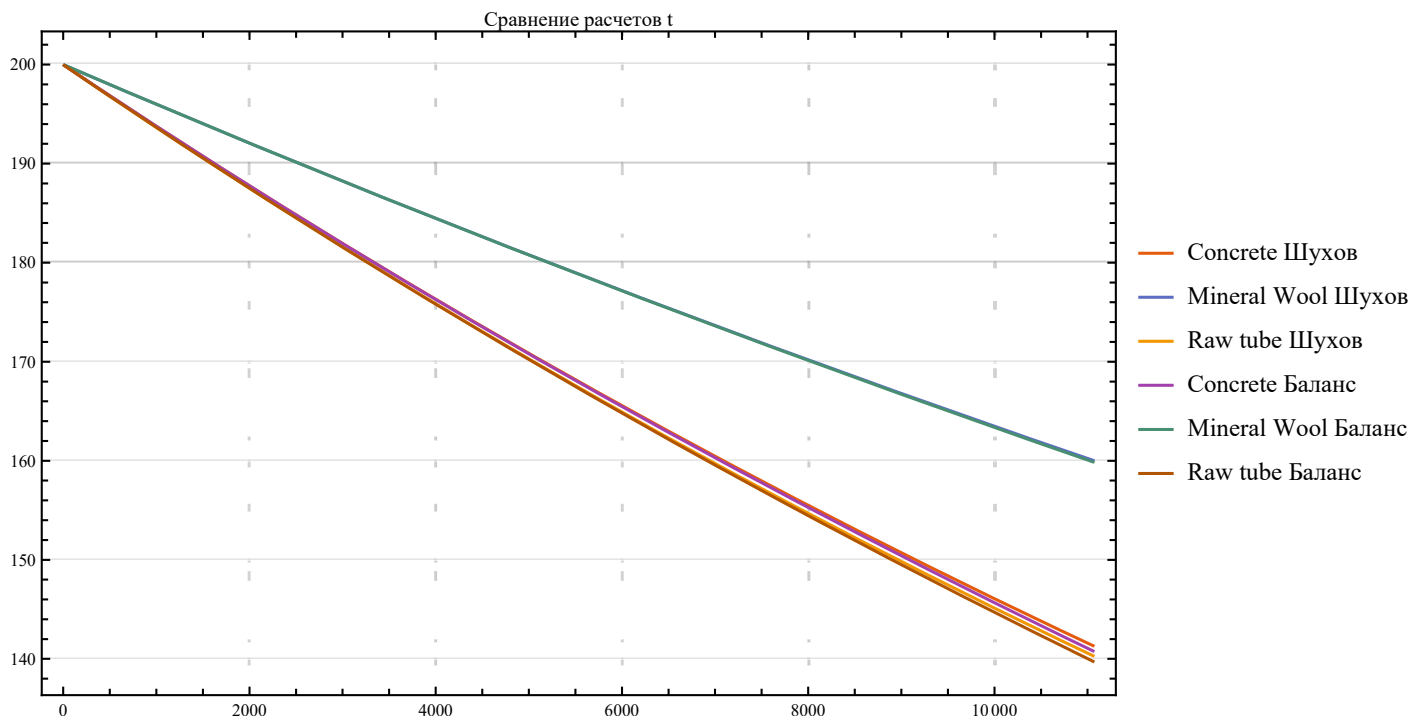




## Сопоставим функции температур в одной системе координат:

```
In[36]:= Plot[{t[x, KlinearConcrete], t[x, KlinearMinWool],
  график функции
  t[x, KlinearRaw], tLiquid2asVariable[KlinearConcrete, x],
  tLiquid2asVariable[KlinearMinWool, x], tLiquid2asVariable[KlinearRaw, x]},
  {x, 0, L}, PlotLabel → "Сравнение расчетов t", PlotTheme → "Scientific",
  пометка графика тематический стиль графика
  PlotLegends → {"Concrete Шухов", "Mineral Wool Шухов", "Raw tube Шухов", "Concrete Баланс",
  легенды графика
  "Mineral Wool Баланс", "Raw tube Баланс"}, ImageSize → Large, GridLines → Automatic]
  размер изоб... круп... линии коорд... автоматический
```

Out[36]=



Точно так же изобразим функции линейных плотностей тепловых потоков.

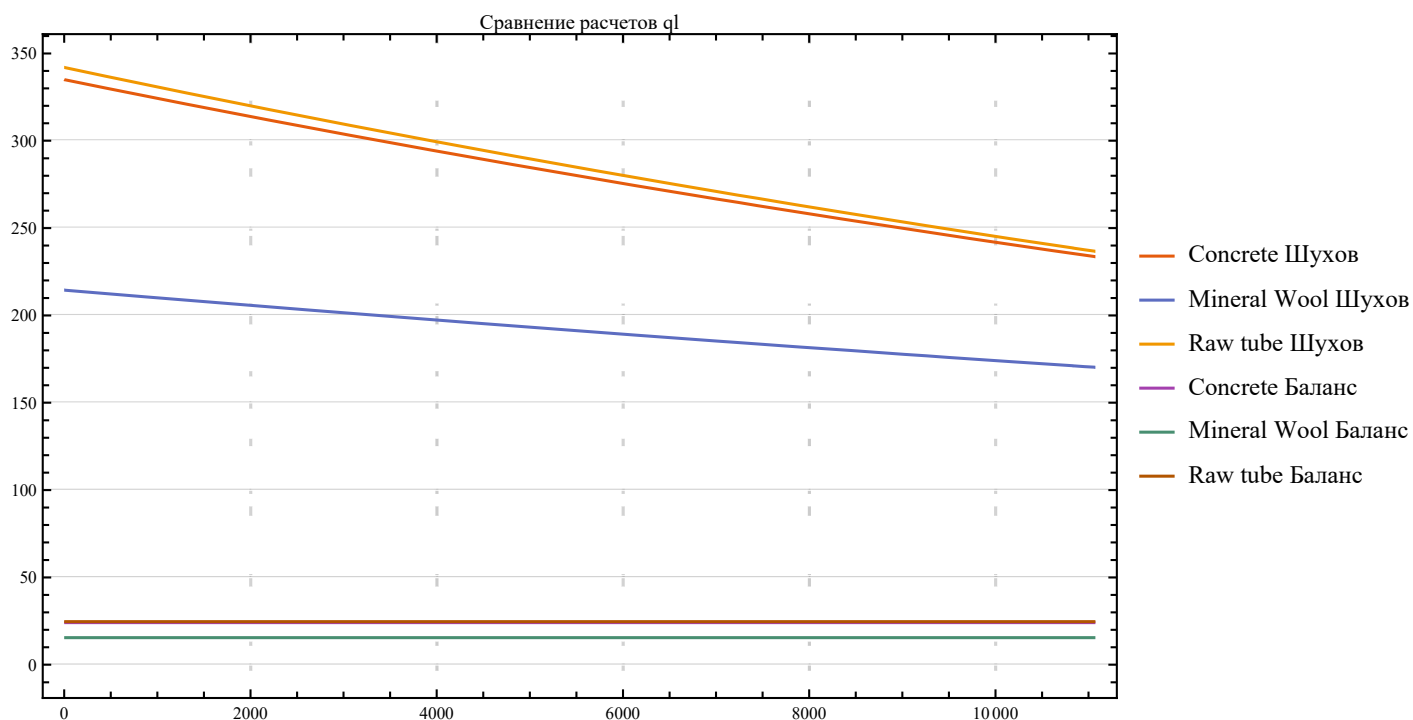
Для начала введем функцию линейной плотности теплового потока при расчете методом баланса энергий:

```
In[37]:= qLinearAdditionalFunction[k_] := k * π *  $\left( \frac{t_{\text{Liquid1}} - t_{\text{Liquid2}}}{2} - t_{\text{Air}} \right)$ 
```

Покажем графики линейных плотностей тепловых потоков в одной координатной плоскости  $ql(W/m)$ :

```
In[38]:= Plot[{qLinear[x, KlinearConcrete], qLinear[x, KlinearMinWool],
  график функции
  qLinear[x, KlinearRaw], qLinearAdditionalFunction[KlinearConcrete],
  qLinearAdditionalFunction[KlinearMinWool], qLinearAdditionalFunction[KlinearRaw]},
  {x, 0, L}, PlotLabel -> "Сравнение расчетов ql", PlotTheme -> "Scientific",
  пометка графика
  PlotLegends -> {"Concrete Шухов", "Mineral Wool Шухов", "Raw tube Шухов", "Concrete Баланс",
  легенды графика
  "Mineral Wool Баланс", "Raw tube Баланс"}, ImageSize -> Large, GridLines -> Automatic]
  размер изоб... круп... линии коорд... автоматический
```

Out[38]=



Теперь построим поверхностные плотности тепловых потоков  $qc(W/m^2)$ :

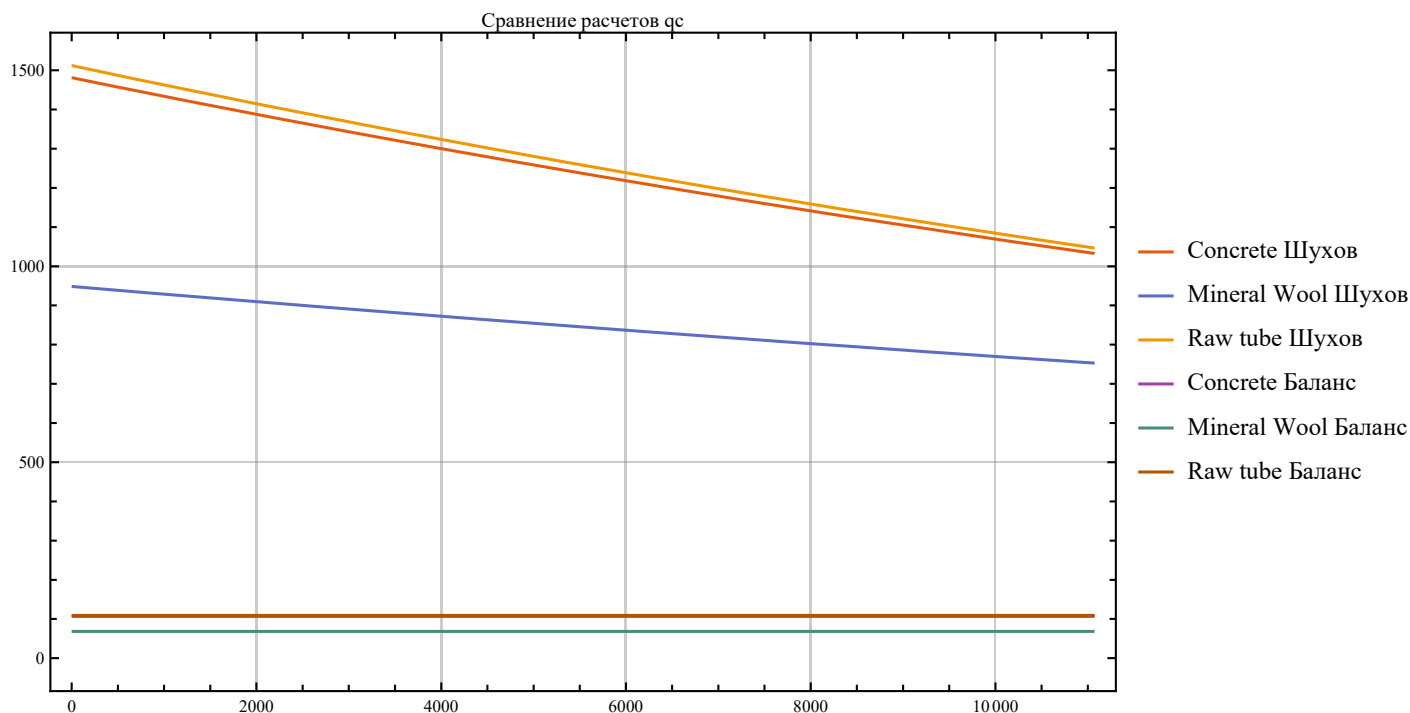
```
In[39]:= qcShuhov[x_, k_] :=  $\frac{qLinear[x, k]}{\pi * d1}$ ; qcBalance[k_] :=  $\frac{qLinearAdditionalFunction[k]}{\pi * d1}$ ;
```

```

In[40]:= Plot[{qcShuhov[x, KlinearConcrete], qcShuhov[x, KlinearMinWool], qcShuhov[x, KlinearRaw],
[график функции]
      qcBalance[KlinearConcrete], qcBalance[KlinearMinWool], qcBalance[KlinearRaw]],
{x, 0, L}, PlotLabel → "Сравнение расчетов qc", PlotTheme → "Scientific",
[пометка графика] [тематический стиль графика]
PlotLegends → {"Concrete Шухов", "Mineral Wool Шухов", "Raw tube Шухов", "Concrete Баланс",
[легенды графика]
      "Mineral Wool Баланс", "Raw tube Баланс"}, ImageSize → Large, GridLines → Automatic]
[размер изображ...] [круп...] [линии координат...] [автоматический]

```

Out[40]=



Найдем среднее значение линейной плотности теплового потока ( $W/m$ ):

```

In[41]:= qLinearAverageWithoutInsulation = (qLinear[0, KlinearRaw] + qLinear[L, KlinearRaw]) / 2
Out[41]= 289.34801

In[42]:= qLinearAverageConcreteInsulation = (qLinear[0, KlinearConcrete] + qLinear[L, KlinearConcrete]) / 2
Out[42]= 284.30313

In[43]:= qLinearAverageMinWoolInsulation = (qLinear[0, KlinearMinWool] + qLinear[L, KlinearMinWool]) / 2
Out[43]= 192.40962

```

Среднее значение температуры на поверхности труб:

```

In[44]:= NSolve[{qLinearAverageWithoutInsulation == π * (twWithoutIns - tAir) / (1/(α*d2)),
[численное решение уравнений]
      qLinearAverageConcreteInsulation == π * (twConcreteIns - tAir) / (1/(α*d3)),
      qLinearAverageMinWoolInsulation == π * (twMinWoolIns - tAir) / (1/(α*d3))}, {twWithoutIns, twConcreteIns, twMinWoolIns}]
Out[44]= {{twWithoutIns → 87.075997, twConcreteIns → 78.420371, twMinWoolIns → 55.012392}}

In[45]:= twWithoutIns = 49.902233; twConcreteIns = 47.0828314; twMinWoolIns = 38.209809;

```

Учтем излучение  
 $\sigma$ - константа Стефана – Больцмана ( $W / m^2 K^4$ )

In[46]:=  $\sigma = 5.671 \cdot 10^{-8};$

Переведем температуры на поверхности труб и температуру воздуха в абсолютные единицы (Кельвины)

In[47]:=  $TwWithoutIns = twWithoutIns + 273.15;$   
 $TwConcreteIns = twConcreteIns + 273.15;$   
 $TwMinWoolIns = twMinWoolIns + 273.15;$   
 $Tair = tAir + 273.15;$

Найдем результирующую плотность потока излучения  $E_{res} (W / m^2)$ :

In[48]:=  $E_{resMinWool} = \epsilon * \sigma * (TwMinWoolIns^4 - Tair^4)$

Out[48]=  
 150.89656

In[49]:=  $E_{resConcrete} = \epsilon * \sigma * (TwConcreteIns^4 - Tair^4)$

Out[49]=  
 201.6176

In[50]:=  $E_{resWithoutIns} = \epsilon * \sigma * (TwWithoutIns^4 - Tair^4)$

Out[50]=  
 218.64292

Найдем эквивалентный коэффициент теплоотдачи излучением  $\alpha_{Eqv} (W / m^2 K)$ :

In[51]:=  $\alpha_{EqvMinWool} = \frac{E_{resMinWool}}{TwMinWoolIns - Tair}$

Out[51]=  
 4.6848016

In[52]:=  $\alpha_{EqvConcrete} = \frac{E_{resConcrete}}{TwConcreteIns - Tair}$

Out[52]=  
 4.9075877

In[53]:=  $\alpha_{EqvWithoutIns} = \frac{E_{resWithoutIns}}{TwWithoutIns - Tair}$

Out[53]=  
 4.9802232

In[54]:=  $MradMinWool = \frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{Steel}} * \text{Log}\left[\frac{d2}{d1}\right] + \frac{1}{2 * \lambda_{MinWool}} * \text{Log}\left[\frac{d3}{d2}\right] + \frac{1}{(\alpha + \alpha_{EqvMinWool}) * d3}$

Out[54]=  
 2.6424856

In[55]:=  $MradConcrete = \frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{Steel}} * \text{Log}\left[\frac{d2}{d1}\right] + \frac{1}{2 * \lambda_{Concrete}} * \text{Log}\left[\frac{d3}{d2}\right] + \frac{1}{(\alpha + \alpha_{EqvConcrete}) * d3}$

Out[55]=  
 1.6136982

In[56]:=  $MradWithoutIns = \frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{Steel}} * \text{Log}\left[\frac{d2}{d1}\right] + \frac{1}{(\alpha + \alpha_{EqvWithoutIns}) * d3}$

Out[56]=  
 1.5742154

$$\text{In}[57]:= P = \left(\frac{d1}{2}\right)^2 * w * \rho_{Average} * cp_{Average} * 1000$$

$$\text{Out}[57]= 16880.431$$

$$\text{In}[58]:= t_{Liquid2RadiationVariable}[M\_ , x\_ ] := \frac{2 * P * M * t_{Liquid1} + 2 * t_{Air} * x - t_{Liquid1} * x}{x + 2 * P * M}$$

Линейная плотность потока излучения для трубы с ватной изоляцией:

$$\text{In}[59]:= q_{LinearRadiationMinWool}[x\_ ] := \pi * \frac{\left(\frac{t_{Liquid1} + t_{Liquid2RadiationVariable}[MradMinWool, x]}{2} - t_{Air}\right)}{\frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{Steel}} * \text{Log}\left[\frac{d2}{d1}\right] + \frac{1}{2 * \lambda_{Concrete}} * \text{Log}\left[\frac{d3}{d2}\right] + \frac{1}{(\alpha + \alpha_{EqvMinWool}) * d3}}$$

Из баланса энергий найдем длину трубы:

$$\text{In}[60]:= \text{NSolve}\left[\frac{\left(\frac{t_{Liquid1} + t_{Liquid2}}{2} - t_{Air}\right)}{\frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{Steel}} * \text{Log}\left[\frac{d2}{d1}\right] + \frac{1}{2 * \lambda_{Concrete}} * \text{Log}\left[\frac{d3}{d2}\right] + \frac{1}{(\alpha + \alpha_{EqvMinWool}) * d3}} * Len == \right.$$

$$\left. \pi * \left(\frac{d1}{2}\right)^2 * w * \rho_{Average} * cp_{Average} * 1000 * (t_{Liquid1} - t_{Liquid2}), Len\right]$$

$$\text{Out}[60]= \{\{Len \rightarrow 19758.345\}\}$$

Если учитывать излучение тогда длина трубы будет другой(m):

$$\text{In}[61]:= L_{withRadiation} = 19758.345;$$

Линейная плотность потока излучения трубы с ватной изоляцией:(W/m)

$$\text{In}[62]:= q_{LinearRadiationMinWool}[L_{withRadiation}]$$

$$\text{Out}[62]= 307.86524$$

Для трубы без изоляции : (W / m<sup>2</sup>)

$$\text{In}[63]:= q_{LinearRadiationWithoutIns}[x\_ ] := \pi * \frac{\left(\frac{t_{Liquid1} + t_{Liquid2RadiationVariable}[MradWithoutIns, x]}{2} - t_{Air}\right)}{\frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{Steel}} * \text{Log}\left[\frac{d2}{d1}\right] + \frac{1}{(\alpha + \alpha_{EqvWithoutIns}) * d3}}$$

$$\text{In}[64]:= q_{LinearRadiationWithoutIns}[L_{withRadiation}]$$

$$\text{Out}[64]= 282.23218$$

$$\text{In}[65]:= t_{Liquid2RadiationVariableWithoutIns} = t_{Liquid2RadiationVariable}[MradWithoutIns, L_{withRadiation}]$$

$$\text{Out}[65]= 94.84651$$

Для трубы с изоляцией из бетона:

$$\text{In}[66]:= q_{LinearRadiationConcrete}[x\_ ] := \pi * \frac{\left(\frac{t_{Liquid1} + t_{Liquid2RadiationVariable}[MradConcrete, x]}{2} - t_{Air}\right)}{\frac{1}{\alpha * d1} + \frac{1}{2 * \lambda_{Steel}} * \text{Log}\left[\frac{d2}{d1}\right] + \frac{1}{2 * \lambda_{Concrete}} * \text{Log}\left[\frac{d3}{d2}\right] + \frac{1}{(\alpha + \alpha_{EqvConcrete}) * d3}}$$

$$\text{In}[67]:= q_{LinearRadiationConcrete}[L_{withRadiation}]$$

$$\text{Out}[67]= 277.16461$$

$$\text{In}[68]:= t_{Liquid2RadiationVariable}[MradConcrete, L_{withRadiation}]$$

$$\text{Out}[68]= 96.734576$$

## Рассчитаем потери теплоты:

```
In[69]:= QradConcrete[x_] := qLinearRadiationConcrete[x] * x;
QradMinWool[x_] := qLinearRadiationMinWool[x] * x;
QradWithoutIns[x_] := qLinearRadiationWithoutIns[x] * x;
```

## Потери теплоты в трубе с бетонной изоляцией:(W)

```
In[72]:= QradConcrete[LwithRadiation]
```

```
Out[72]= 5.476314 × 106
```

## Потери теплоты в трубе с ватной изоляцией:(W)

```
In[73]:= QradMinWool[LwithRadiation]
```

```
Out[73]= 6.0829076 × 106
```

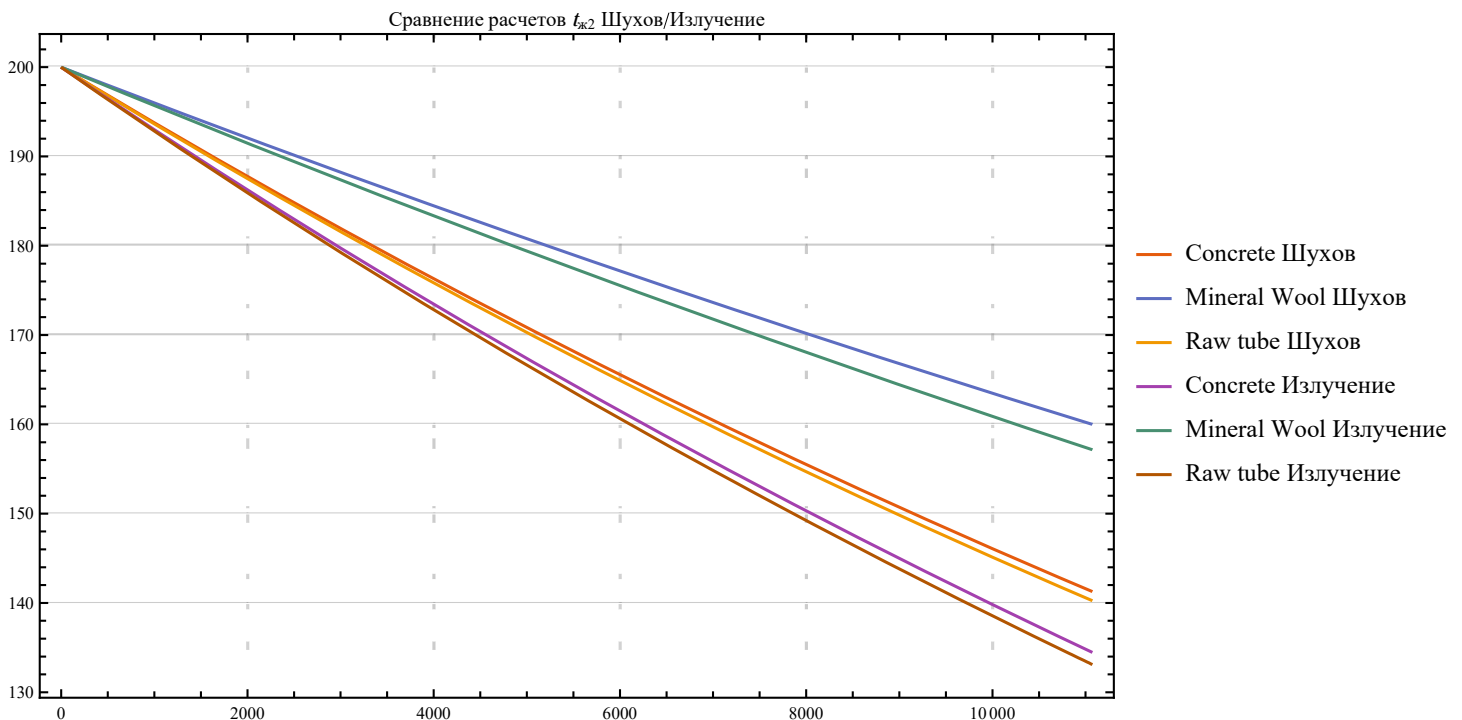
```
In[74]:= QradWithoutIns[LwithRadiation]
```

```
Out[74]= 5.5764408 × 106
```

## Сравним расчеты температуры(Шухов/Излучение):

```
In[75]:= Plot[{t[x, KlinearConcrete], t[x, KlinearMinWool], t[x, KlinearRaw],
|график функции
  tLiquid2RadiationVariable[MradConcrete, x], tLiquid2RadiationVariable[MradMinWool, x],
  tLiquid2RadiationVariable[MradWithoutIns, x]}, {x, 0, L},
PlotLabel → "Сравнение расчетов tж2 Шухов/Излучение", PlotTheme → "Scientific",
|пометка графика |тематический стиль графика
PlotLegends → {"Concrete Шухов", "Mineral Wool Шухов", "Raw tube Шухов", "Concrete Излучение",
|легенды графика
  "Mineral Wool Излучение", "Raw tube Излучение"}, ImageSize → Large, GridLines → Automatic]
|размер изоб... |круп... |линии коорд... |автоматический
```

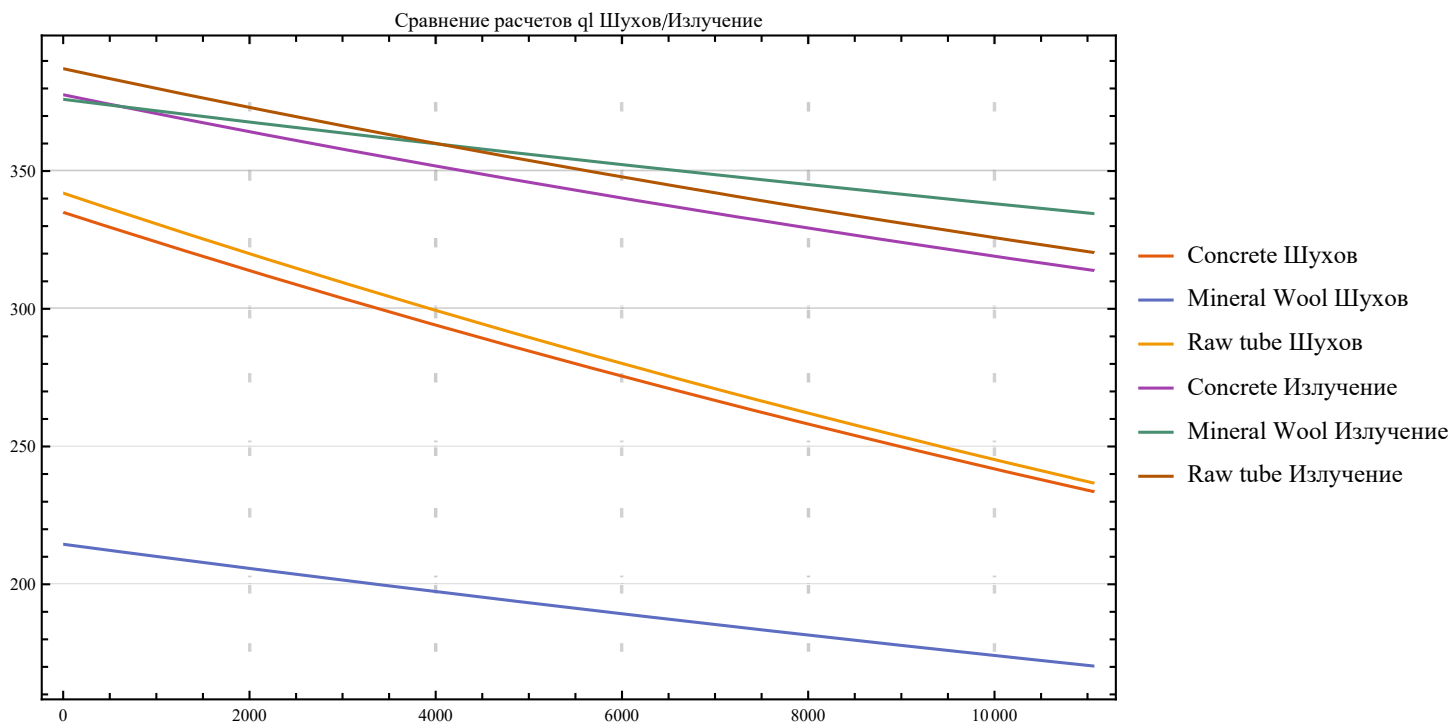
```
Out[75]=
```



## Сравним расчеты линейной плотности потоков тепла/излучения(Шухов/Излучение):

```
In[76]:= Plot[{qLinear[χ, KlinearConcrete], qLinear[χ, KlinearMinWool], qLinear[χ, KlinearRaw],
  график функции
  qLinearRadiationConcrete[χ], qLinearRadiationMinWool[χ], qLinearRadiationWithoutIns[χ]},
  {χ, 0, L}, PlotLabel → "Сравнение расчетов ql Шухов/Излучение", PlotTheme → "Scientific",
  пометка графика
  PlotLegends → {"Concrete Шухов", "Mineral Wool Шухов", "Raw tube Шухов", "Concrete Излучение",
  легенды графика
  "Mineral Wool Излучение", "Raw tube Излучение"}, ImageSize → Large, GridLines → Automatic]
  размер изоб... круп... линии коорд... автоматический
```

Out[76]=



Соберем все результаты выше воедино.

Способ основанный на формуле Шухова.

Температуры жидкости на выходе(°C):(порядок:бетон,вата,без изоляции)

```
In[77]:= t[L, KlinearConcrete]
```

Out[77]=

141.26892

```
In[78]:= t[L, KlinearMinWool]
```

Out[78]=

160.

```
In[79]:= t[L, KlinearRaw]
```

Out[79]=

140.25367

Тепловой поток(W):(порядок:бетон,вата,без изоляции)

```
In[80]:= Q[L, KlinearConcrete]
```

Out[80]=

$2.5867185 \times 10^6$

```
In[81]:= Q[L, KlinearMinWool]
```

Out[81]=

$1.8857691 \times 10^6$

```
In[82]:= Q[L, KlinearRaw]
```

Out[82]=

$2.6209415 \times 10^6$

Способ основанный на методе баланса энергии.

Температуры жидкости на выходе( $^{\circ}\text{C}$ ):(порядок:бетон,вата,без изоляции)

```
In[83]:= tLiquid2asVariable[KlinearConcrete, Ladditional]
```

```
Out[83]= 140.953
```

```
In[84]:= tLiquid2asVariable[KlinearMinWool, Ladditional]
```

```
Out[84]= 160.00001
```

```
In[85]:= tLiquid2asVariable[KlinearRaw, Ladditional]
```

```
Out[85]= 139.91041
```

Тепловой поток( $W$ ):(порядок:бетон,вата,без изоляции)

```
In[86]:= Qadditional[k_, x_] := qLinear[x, k] * x;
```

```
In[87]:= Qadditional[KlinearConcrete, Ladditional]
```

```
Out[87]= 2.5793938 × 106
```

```
In[88]:= Qadditional[KlinearMinWool, Ladditional]
```

```
Out[88]= 1.8793518 × 106
```

```
In[89]:= Qadditional[KlinearRaw, Ladditional]
```

```
Out[89]= 2.613607 × 106
```

Способ с учетом излучения. Температуры жидкости на выходе( $^{\circ}\text{C}$ ):(порядок:бетон,вата,без изоляции)

```
In[90]:= tLiquid2RadiationVariable[MradConcrete, LwithRadiation]
```

```
Out[90]= 96.734576
```

```
In[91]:= tLiquid2RadiationVariable[MradMinWool, LwithRadiation]
```

```
Out[91]= 129.64878
```

```
In[92]:= tLiquid2RadiationVariable[MradWithoutIns, LwithRadiation]
```

```
Out[92]= 94.84651
```

Поток излучения( $W$ ):(порядок:бетон,вата,без изоляции)

```
In[93]:= QradConcrete[LwithRadiation]
```

```
Out[93]= 5.476314 × 106
```

```
In[94]:= QradMinWool[LwithRadiation]
```

```
Out[94]= 6.0829076 × 106
```

```
In[95]:= QradWithoutIns[LwithRadiation]
```

```
Out[95]= 5.5764408 × 106
```

Найдем критический диаметр при бетонной и ватной изоляциях

```
In[96]:= d2 // N
```

численное приближение

```
Out[96]= 0.08
```



$$\text{In[97]:= } d_{\text{CriticalConcrete}} = d_2 + \frac{2 \lambda_{\text{Concrete}}}{\alpha}$$

Out[97]=  
0.26028169

Мы не дошли до критического диаметра для трубы с бетонной изоляцией.

$$\text{In[98]:= } d_{\text{CriticalMinWool}} = d_2 + \frac{2 \lambda_{\text{MinWool}}}{\alpha}$$

Out[98]=  
0.086338028

Мы перешли критический диаметр для трубы с ватной изоляцией.

Вывод: Тепло от теплоносителя лучше всего сохраняет труба с ватной изоляцией. На втором месте бетон. На третьем- труба без изоляции.