

# Обработка результатов измерений лабораторной работы №36

## “Определение тепловых свойств материалов методом регулярного режима”

Примечание : Калориметр 1 -водяная камера, калориметры 2 и 3 -воздушная камера

Данные эксперимента:

$\tau$ -время опыта

t1 - t8 показания термопар в калориметрах и камерах: 1-2-калориметр 1; 3-4-калориметр 2; 5-6 калориметр 3; 7-воздушная камера; 8 - водяная камера.

In[139]:=

```
 $\tau = \text{Quantity}[\text{Table}[25 + 50 * i, \{i, 0, 34\}], \text{"Seconds"}]$ 
```

[размерна] [таблица значений]

Out[139]=

```
{ 25 s , 75 s , 125 s , 175 s , 225 s , 275 s , 325 s , 375 s , 425 s , 475 s , 525 s , 575 s , 625 s ,  
675 s , 725 s , 775 s , 825 s , 875 s , 925 s , 975 s , 1025 s , 1075 s , 1125 s , 1175 s ,  
1225 s , 1275 s , 1325 s , 1375 s , 1425 s , 1475 s , 1525 s , 1575 s , 1625 s , 1675 s , 1725 s }
```

```

t1 = Quantity[{20.6, 24.8, 27.0, 29.1, 30.6, 31.5, 32.1, 33.2, 34.0, 34.6, 35.4,
размерная величина
35.7, 36.3, 36.7, 36.9, 37.4, 38.0, 38.4, 38.7, 39.0, 39.3, 39.3, 39.6, 40.2, 40.1,
40.3, 40.6, 40.7, 40.9, 41.3, 41.3, 41.5, 41.4, 41.7, 41.7}, "DegreesCelsius"];
t2 = Quantity[{21.8, 22.2, 23.1, 27.0, 25.5, 26.6, 27.3, 28.4, 29.5, 30.4, 31.5,
размерная величина
32.4, 33.4, 34.1, 35.3, 36.0, 36.7, 37.5, 36.1, 33.5, 39.0, 39.6, 39.9, 40.5, 40.7,
41.0, 41.4, 41.7, 42.0, 42.2, 42.5, 42.8, 42.9, 43.1, 43.2}, "DegreesCelsius"];
t3 = Quantity[{22.5, 24.0, 24.9, 25.9, 26.6, 27.2, 27.7, 28.4, 28.9, 27.5, 29.9,
размерная величина
30.3, 30.7, 31.2, 31.7, 32.0, 32.5, 32.8, 33.3, 33.6, 34.0, 34.2, 34.6, 34.9, 35.2,
35.6, 35.8, 36.1, 36.3, 36.7, 37.1, 37.2, 37.4, 37.5, 37.8}, "DegreesCelsius"];
t4 = Quantity[{22.1, 22.6, 23.2, 24.0, 24.6, 25.2, 25.7, 26.5, 26.9, 27.7, 28.2,
размерная величина
28.7, 29.0, 29.5, 30.1, 30.5, 31.1, 31.3, 31.9, 32.2, 32.7, 33.0, 33.4, 33.7, 34.0,
34.4, 34.8, 35.1, 35.2, 35.6, 36.0, 36.2, 36.5, 36.7, 36.8}, "DegreesCelsius"];
t5 = Quantity[{24.7, 25.6, 26.6, 27.3, 28.0, 28.1, 28.6, 29.0, 29.5, 29.7, 30.2,
размерная величина
30.6, 30.8, 31.2, 31.5, 31.7, 32.1, 32.5, 32.7, 33.1, 33.1, 33.5, 33.6, 34.0, 34.1,
34.3, 34.6, 34.8, 34.9, 35.2, 35.4, 35.7, 35.9, 36.0, 36.3}, "DegreesCelsius"];
t6 = Quantity[{25.6, 26.6, 27.5, 28.0, 28.6, 29.0, 29.6, 29.9, 30.1, 30.6, 31.0,
размерная величина
31.2, 31.4, 31.9, 32.3, 32.4, 32.8, 33.1, 33.4, 33.6, 33.8, 34.0, 34.2, 34.6, 34.7,
35.0, 35.2, 35.3, 35.5, 35.8, 36.0, 36.2, 36.6, 36.7, 36.8}, "DegreesCelsius"];
t7 = Quantity[{41.3, 41.0, 41.0, 40.7, 40.8, 41.0, 41.2, 41.1, 41.1, 41.2, 41.3,
размерная величина
41.3, 41.3, 41.3, 41.4, 41.6, 41.6, 41.7, 41.8, 41.9, 41.8, 41.8, 41.8, 41.9, 41.9,
41.9, 42.1, 45.1, 42.1, 42.3, 42.1, 42.3, 42.3, 42.3, 42.4}, "DegreesCelsius"];
t8 = Quantity[{44.7, 44.7, 44.8, 44.7, 44.7, 44.8, 44.7, 44.9, 44.9, 44.8, 44.9,
размерная величина
44.9, 44.8, 44.7, 44.8, 44.8, 44.8, 44.9, 44.8, 44.9, 44.7, 44.7, 44.8, 44.7, 44.8,
44.8, 44.9, 44.9, 44.7, 44.9, 44.9, 44.9, 44.9, 44.8, 44.9}, "DegreesCelsius"];

```

$\theta$ -разность температур какой-либо точки тела и среды. Учитывая что K1-водяная камера, а K2 K3- воздушная, найдем  $\ln(\theta_{1-6})$ , где  $\theta_{1,2}$  для калориметра в водяной камере а остальные для калориметров воздушных камерах

```

In[148]:=
In01 = Log[QuantityMagnitude[t8 - t1]]
на... модуль размерной величины

Out[148]=
{2.9549103, 2.7212954, 2.5494452, 2.3887628, 2.2617631, 2.163323, 2.0281482,
1.9315214, 1.9169226, 1.8718022, 1.8082888, 1.7578579, 1.6292405, 1.6486586,
1.6292405, 1.5040774, 1.4816045, 1.458615, 1.410987, 1.3609766, 1.3083328,
1.3083328, 1.2237754, 1.1631508, 0.95551145, 1.1631508, 1.0647107, 0.95551145,
0.95551145, 0.83290912, 0.83290912, 0.83290912, 0.69314718, 0.74193734, 0.64185389}

In[149]:=
In02 = Log[QuantityMagnitude[t8 - t2]]
на... модуль размерной величины

Out[149]=
{3.1000923, 3.0864866, 3.08191, 3.034953, 2.9907197, 2.9231616, 2.8390785, 2.7663191, 2.7343675,
2.7013612, 2.653242, 2.6026897, 2.5336968, 2.501436, 2.4069451, 2.3795461, 2.3418058, 2.3223877,
2.2512918, 2.2192035, 2.163323, 2.1162555, 2.0541237, 1.9878743, 1.9600948, 1.9021075, 1.8245493,
1.7917595, 1.7578579, 1.7047481, 1.6292405, 1.5686159, 1.5260563, 1.5040774, 1.458615}

```

```

In[150]:=
In03 = Log[QuantityMagnitude[t7 - t3]]
      на... [модуль размерной величины]

Out[150]=
{2.8959119, 2.8564702, 2.8213789, 2.7911651, 2.7663191, 2.7343675, 2.7013612, 2.6810215,
 2.6672282, 2.6602595, 2.6390573, 2.6318888, 2.6318888, 2.6026897, 2.587764, 2.587764, 2.5726122,
 2.5572273, 2.5336968, 2.541602, 2.5176965, 2.5095993, 2.5095993, 2.4765384, 2.4765384, 2.4849066,
 2.4765384, 2.442347, 2.442347, 2.4336134, 2.4069451, 2.4069451, 2.4159138, 2.3978953, 2.3978953}

In[151]:=
In04 = Log[QuantityMagnitude[t7 - t4]]
      на... [модуль размерной величины]

Out[151]=
{2.9231616, 2.9123507, 2.9014216, 2.8848007, 2.8791985, 2.8564702, 2.8390785,
 2.8273136, 2.8154087, 2.8033604, 2.7972813, 2.7788193, 2.7850112, 2.7600099,
 2.7536607, 2.7472709, 2.7343675, 2.7146947, 2.7146947, 2.7013612, 2.6878475,
 2.6878475, 2.6810215, 2.653242, 2.653242, 2.6602595, 2.6390573, 2.6173958,
 2.6246686, 2.6026897, 2.5952547, 2.587764, 2.5726122, 2.5649494, 2.5649494}

In[152]:=
In05 = Log[QuantityMagnitude[t7 - t5]]
      на... [модуль размерной величины]

Out[152]=
{2.9014216, 2.8507065, 2.8154087, 2.7850112, 2.7536607, 2.7146947, 2.6810215, 2.6602595,
 2.6461748, 2.6246686, 2.6100698, 2.5952547, 2.587764, 2.5649494, 2.5494452, 2.5336968, 2.5176965,
 2.5176965, 2.4849066, 2.4765384, 2.4680995, 2.4510051, 2.442347, 2.4248027, 2.4159138, 2.4069451,
 2.3887628, 2.360854, 2.360854, 2.3321439, 2.3321439, 2.3223877, 2.3125354, 2.2925348, 2.2721259}

In[153]:=
In06 = Log[QuantityMagnitude[t7 - t6]]
      на... [модуль размерной величины]

Out[153]=
{2.8959119, 2.8507065, 2.8094027, 2.7788193, 2.7343675, 2.7080502, 2.6741486,
 2.6461748, 2.6318888, 2.6173958, 2.6100698, 2.5726122, 2.5726122, 2.5572273,
 2.5494452, 2.5176965, 2.5095993, 2.501436, 2.4765384, 2.4680995, 2.442347,
 2.4336134, 2.4336134, 2.4159138, 2.3978953, 2.3978953, 2.3795461, 2.3513753,
 2.3513753, 2.3418058, 2.3223877, 2.2925348, 2.2823824, 2.2721259, 2.2617631}

```

## Изобразим зависимости $\ln\theta_{1-6}(\tau)$

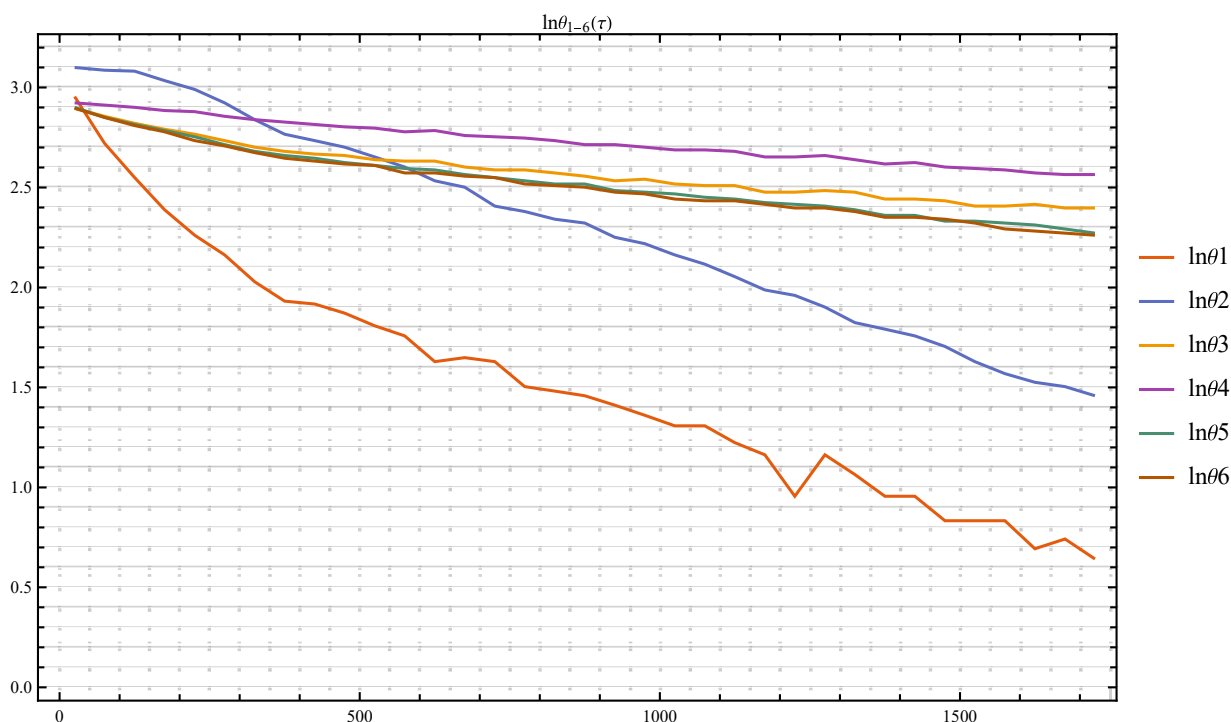
In[154]:=

```

bufferInθ[i_] := Table[{QuantityMagnitude[τ[[j]]],
                        |таблиц... |модуль размерной величины
                        Evaluate[ToExpression["lnθ" <> ToString[i]][[j]]], {j, 1, Length[τ]}}];
                        |вычислить |создать выражение |преобразовать в строку |длина
ListLinePlot[Map[bufferInθ, Range[1, 6]], GridLines → {Range[0, 1750, 50], Range[0, 4, 0.1]},
|линейный гра... |преобразовать |диапазон |линии коорди... |диапазон |диапазон
PlotLabel → "lnθ1-6(τ)", PlotTheme → "Scientific",
|пометка графика |тематический стиль графика
PlotLegends → {"lnθ1", "lnθ2", "lnθ3", "lnθ4", "lnθ5", "lnθ6"}, ImageSize → Large]
|легенды графика |размер изоб... |крупный

```

Out[155]=

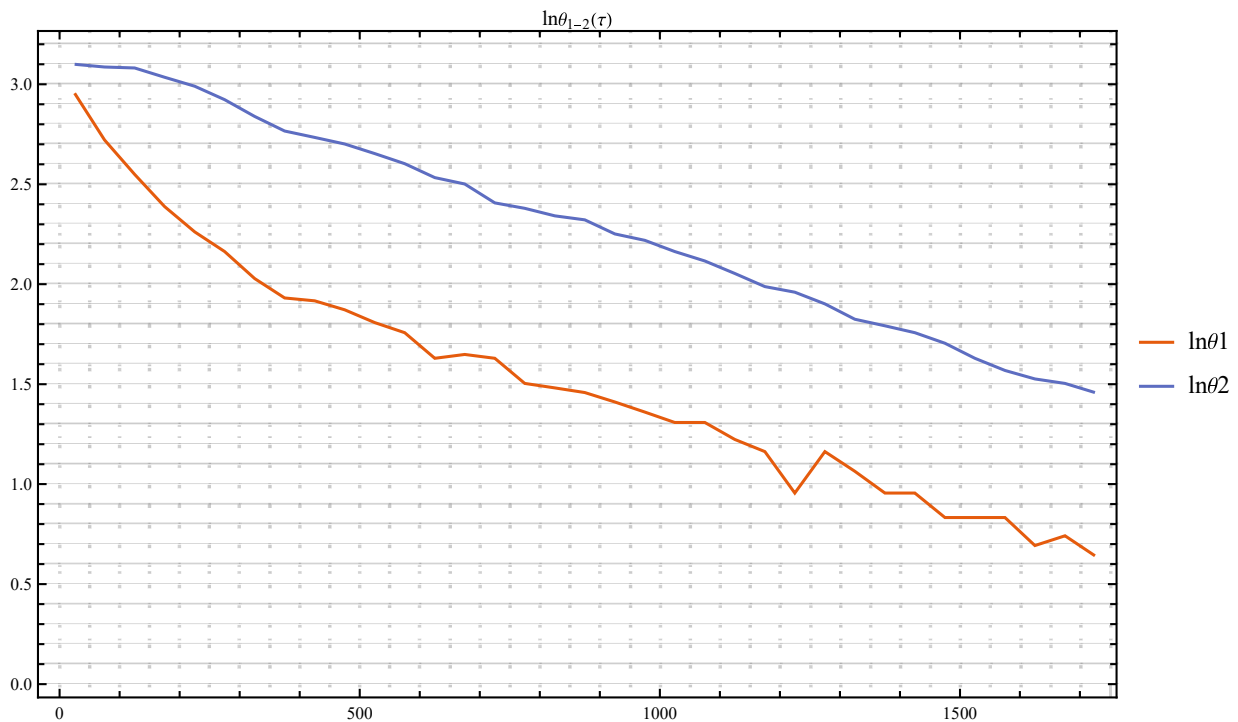


Изобразим отдельно графики для каждого калориметра для поиска участков линейной зависимости:

In[156]:=

```
ListLinePlot[Map[buffersInΘ, Range[1, 2]],
  |линейный гра... |преобразовать |диапазон
  GridLines → {Range[0, 1750, 50], Range[0, 4, 0.1]}, PlotLabel → "lnθ1-2(τ)",
  |линии координат |диапазон |диапазон |пометка графика
  PlotTheme → "Scientific", PlotLegends → {"lnθ1", "lnθ2"}, ImageSize → Large]
  |тематический стиль графика |легенды графика |размер изобра... |крупный
```

Out[156]=

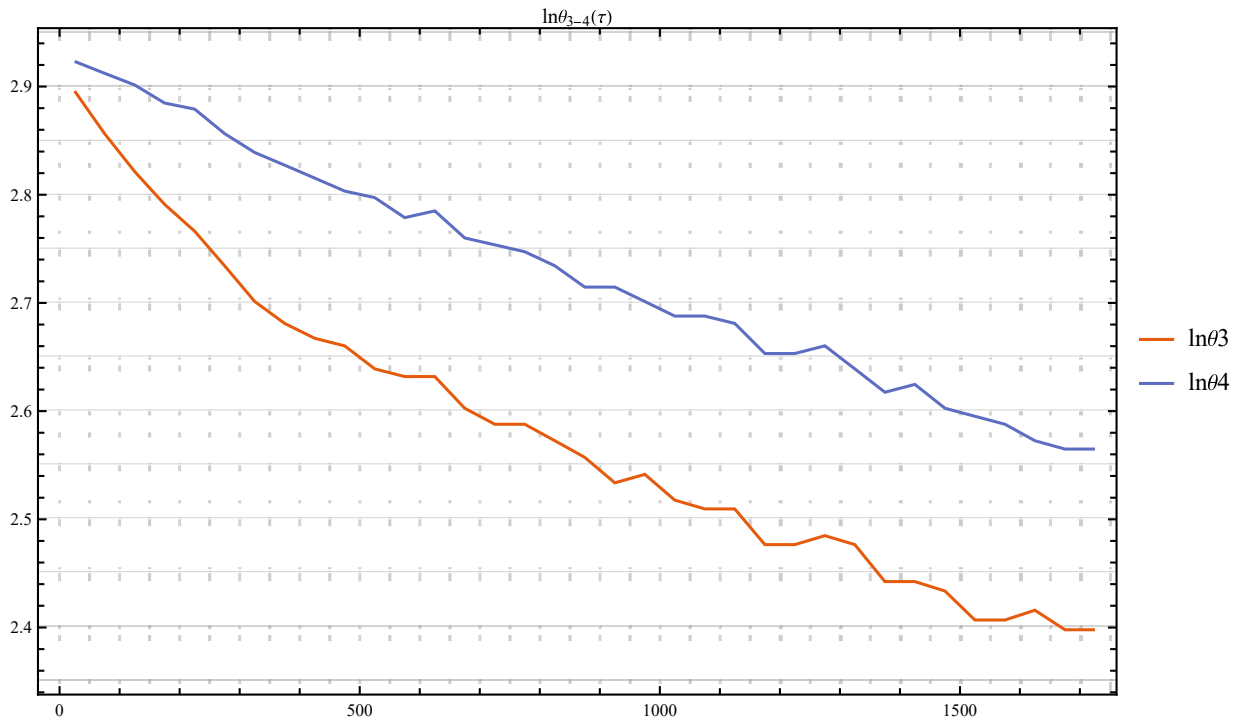


## Линейный участок :325-1750 s ( $\tau_7$ - $\tau_{35}$ ) для первого калориметра

In[157]:=

```
ListLinePlot[Map[bufferIn $\theta$ , Range[3, 4]],
  |линейный гра... |преобразовать |диапазон
  GridLines -> {Range[0, 1750, 50], Range[0, 3, 0.05]}, PlotLabel -> "ln $\theta_{3-4}(\tau)$ ",
  |линии координ... |диапазон |диапазон |пометка графика
  PlotTheme -> "Scientific", PlotLegends -> {"ln $\theta_3$ ", "ln $\theta_4$ "}, ImageSize -> Large]
  |тематический стиль графика |легенды графика |размер изобра... |крупный
```

Out[157]=

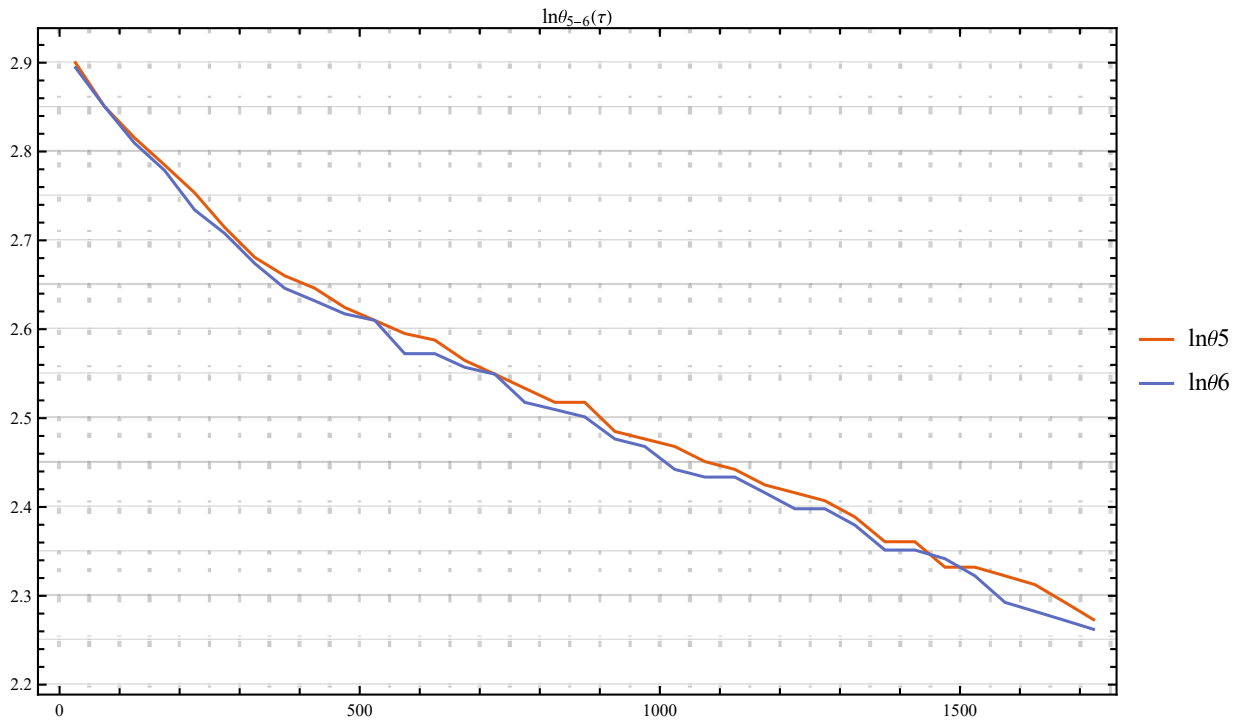


## Линейный участок : 625-1750 s ( $\tau_{13}$ - $\tau_{35}$ ) для второго калориметра

In[158]:=

```
ListLinePlot[Map[bufferIn $\theta$ , Range[5, 6]],
  |линейный гра... |преобразовать |диапазон
  GridLines -> {Range[0, 1750, 50], Range[0, 4, 0.05]}, PlotLabel -> "ln $\theta_{5-6}(\tau)$ ",
  |линии коорди... |диапазон |диапазон |пометка графика
  PlotTheme -> "Scientific", PlotLegends -> {"ln $\theta_5$ ", "ln $\theta_6$ "}, ImageSize -> Large]
  |тематический стиль графика |легенды графика |размер изоб... |крупный
```

Out[158]=



Линейный участок : 525-1250 s ( $\tau_{11}$ - $\tau_{25}$ ) для третьего калориметра

Введем данные о калориметрах:

$M_{cuprum}$ -масса медного (эталонного)калориметра (kg)

$c_{cuprum}$ - удельная теплоемкость меди  $\left(\frac{J}{Kg \cdot K}\right)$

$M_{ob}$ - масса медной оболочки калориметра №2 (kg)

$D_i$ - диаметр  $i$ -го калориметра (m)

$Z_i$ -высота  $i$ -го калориметра(m)

$D_{2inner}$ -внутренний диаметр калориметра №2 (m)

$Z_{2inner}$ -внутренний диаметр калориметра №2(m)

```
In[159]:=
Mcuprum = Quantity[0.23, "Kilograms"];
           |размерная величина

ccuprum = Quantity[390,  $\frac{\text{"Joules"}}{\text{"Kilograms" * "Kelvins"}}$ ];
           |размерная величина

Mob = Quantity[0.073, "Kilograms"];
      |размерная величина
D1 = Quantity[0.04, "Meters"];
    |размерная величина
Z1 = Quantity[0.06, "Meters"];
    |размерная величина
D2 = Quantity[0.0294, "Meters"];
    |размерная величина
Z2 = Quantity[0.054, "Meters"];
    |размерная величина
D2inner = Quantity[0.0286, "Meters"];
          |размерная величина
Z2inner = Quantity[0.0532, "Meters"];
          |размерная величина
D3 = Quantity[0.0294, "Meters"];
    |размерная величина
Z3 = Quantity[0.054, "Meters"];
    |размерная величина
```

Найдем темп нагрева калориметров(1/s)

$m1$ -относится к первому калориметру,  $m11$ - по значениям с первой термопары,  $m12$  по значениям со второй термопары и т.д.

```
In[170]:=
m11 =  $\frac{\ln \theta_1[7] - \ln \theta_1[35]}{\text{QuantityMagnitude}[\tau[35] - \tau[7]]}$ 

Out[170]=
0.00099021026

In[171]:=
m12 =  $\frac{\ln \theta_2[7] - \ln \theta_2[35]}{\text{QuantityMagnitude}[\tau[35] - \tau[7]]}$ 

Out[171]=
0.00098604531
```



```
In[172]:=
m21 = 
$$\frac{\ln \theta 3[[13]] - \ln \theta 3[[35]]}{\text{QuantityMagnitude}[\tau[[35]] - \tau[[13]]]}$$

```

```
Out[172]=
0.00021272142
```

```
In[173]:=
m22 = 
$$\frac{\ln \theta 4[[13]] - \ln \theta 4[[35]]}{\text{QuantityMagnitude}[\tau[[35]] - \tau[[13]]]}$$

```

```
Out[173]=
0.00020005626
```

```
In[174]:=
m31 = 
$$\frac{\ln \theta 5[[11]] - \ln \theta 5[[35]]}{\text{QuantityMagnitude}[\tau[[35]] - \tau[[11]]]}$$

```

```
Out[174]=
0.00028161992
```

```
In[175]:=
m32 = 
$$\frac{\ln \theta 6[[11]] - \ln \theta 6[[35]]}{\text{QuantityMagnitude}[\tau[[35]] - \tau[[11]]]}$$

```

```
Out[175]=
0.00029025558
```

Найдем коэффициенты формы калориметров 1 и 2

```
In[176]:=
K1 = 
$$\left( \frac{5.783}{(D1 / 2)^2} + \frac{9.87}{Z1^2} \right)^{-1}$$

```

```
Out[176]=
0.000058142352 m2
```

```
In[177]:=
K2 = 
$$\left( \frac{5.783}{(D2inner / 2)^2} + \frac{9.87}{Z2inner^2} \right)^{-1}$$

```

```
Out[177]=
0.000031478764 m2
```

Найдем коэффициент температуропроводности исследуемого материала для калориметра №1, используя темп нагрева  $m_{\infty} = m1$  и число Фурье (при  $\tau = \tau 35$ )

```
In[178]:=
a1 = Quantity[QuantityMagnitude[K1 * m11], 
$$\frac{\text{"Meters"}^2}{\text{"Seconds"}}$$
]
```

```
Out[178]=
5.7573153 × 10-8 m2/s
```

```
In[179]:=
Fo = a1 * 
$$\frac{\tau[[35]]}{(D1 / 2)^2}$$

```

```
Out[179]=
0.24828422
```

Определим значения коэффициента неравномерности температурного распределения  $\psi 2$  для калориметра № 2

Для этого найдем  $M$  и воспользуемся таблицей зависимости  $\psi(M)$ :


```
In[180]:=
M2 = QuantityMagnitude[m21 *  $\frac{K2}{a1}$ ]
      [модуль размерной величины]

Out[180]=
0.11630781

In[181]:=
M21 = 0.110;  $\psi$ 21 = 0.918; M22 = 0.123;  $\psi$ 22 = 0.905;
```

Проинтерполируем и найдем наше значение  $\psi$  2:

```
In[182]:=
M $\psi$  = Interpolation[{{0.110, 0.918}, {0.123, 0.905}}, InterpolationOrder -> 1]
      [интерполировать] [порядок интерполяции]

Out[182]=
InterpolatingFunction[ Domain: {{0.11, 0.123}}
Output: scalar ]

In[183]:=
 $\psi$ 2 = M $\psi$ [M2]

Out[183]=
0.91169219
```

Полная теплоемкость калориметра №2 равна сумме теплоемкостей исследуемого материала и оболочки калориметра с учетом коэффициента неравномерности температурного поля, т.е.  $C_2 = C_{2,и} + \psi_2 C_{2,об}$ , при этом площади внешней поверхности калориметров № 2 и № 3 и коэффициенты теплоотдачи с наружных поверхностей равны.

Найдем теплоемкость исследуемого материала:

```
In[184]:=
C2i = (ccuprum * Mcuprum *  $\frac{m31}{m21}$  - ccuprum * Mob) *  $\psi$ 2

Out[184]=
82.310305 J/K
```

Найдем теплоемкость оболочки калориметра:

```
In[185]:=
C2ob = ccuprum * Mob *  $\psi$ 2

Out[185]=
25.955877 J/K
```

Найдем полную теплоемкость калориметра № 2: (можно так же просто сложить теплоемкость исследуемого материала и оболочки калориметра № 2)

```
In[186]:=
C2 = ccuprum * Mcuprum *  $\frac{m31}{m21}$  *  $\psi$ 2

Out[186]=
108.26618 J/K
```

Рассчитаем коэффициент теплопроводности

$\lambda = a * c_{2,и} * \rho_{2,и} = | C_{2,и} = c_{2,и} * M_{2,и} | = a * \frac{C_{2,и}}{V_{2,и}}$ , где  $a$ -коэффициент температуропроводности исследуемого материала, определенный в эксперименте с калориметром №1 ( $a=a1$ ) ( $m^2 / s$ );

$\rho_{2,и}$  - плотность исследуемого материала ( $kg / m^3$ );  $V_{2,и}$ -объем исследуемого материала, определяемый по внутренним размерам калориметра № 2 ( $m^3$ );

Сначала найдем объем исследуемого материала:

In[187]:=

$$V2i = \pi * \left( \frac{D2inner}{2} \right)^2 * Z2inner$$

Out[187]=

0.000034176972 m<sup>3</sup>

Теперь найдем коэффициент теплопроводности  $\lambda$  (с учетом оболочки):

In[188]:=

$$\lambda_{withBoundryLayerIncluded} = \text{UnitConvert} \left[ a1 * \frac{C2i}{V2i}, \frac{\text{"Watts"}}{\text{"Meters"} * \text{"Kelvins"}} \right]$$

Out[188]=

0.13865663 W / (m K)

Теперь найдем коэффициент теплопроводности  $\lambda$  (без учета оболочки):

In[189]:=

$$V2 = \pi * \left( \frac{D2}{2} \right)^2 * Z2; \lambda_{withBoundryLayerNotIncluded} = \text{UnitConvert} \left[ a1 * \frac{C2}{V2}, \frac{\text{"Watts"}}{\text{"Meters"} * \text{"Kelvins"}} \right]$$

Out[189]=

0.17003351 W / (m K)

Проверим выполнение условия о стремлении числа Био к бесконечности ( $Bi \rightarrow \infty$ ) для калориметра № 1. Для этого решим для точки  $r=0$  уравнение (1) относительно  $\mu_1$   
 Уравнение (1):  $\theta = \frac{t_{ж}-t_{r=0}}{t_{ж}-t_0} = \frac{2 J_1(\mu_1)}{\mu_1 * (J_0^2(\mu_1) + J_1^2(\mu_1))} * e^{-\mu_1^2 * Fo}$ , где  $J_0, J_1$  – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно.  $t_{ж}$ -температура водяной камеры в  $\tau_0$ ,  $t_{r=0}$ -температура  $t_2$  в  $\tau_0$ ,  $t_0$ -температура  $t_1$  в  $\tau_0$

In[190]:=

$$\theta = \frac{44.3 - 25.1}{44.3 - 22.1}$$

Out[190]=

0.86486486

Решим уравнение (1) численно относительно  $\mu_1$ :

In[191]:=

$$\text{FindRoot} \left[ \theta = \frac{2 * \text{BesselJ}[1, \mu1]}{\mu1 * ((\text{BesselJ}[0, \mu1])^2 + (\text{BesselJ}[1, \mu1])^2)} * \text{Exp}[-\mu1^2 * Fo], \{\mu1, 3\} \right]; \mu1$$

Out[191]=

$\mu1$

Имеем  $\mu 1 = 3.24246$ . При  $\mu 1 > 2.405 \quad Bi \rightarrow \infty$ . Условие выполнено.

Определим температуру отнесения для  $\alpha$  и  $\lambda$  по формуле (2)

Формула (2):  $t_{\text{отн}} = \frac{t_{k,2} + t_{\text{ж}}}{2}$ , где  $t_{\text{ж}}$  - температура среды в термостате ( $^{\circ}\text{C}$ );  $t_{k,2}$  - температура калориметра № 2 в начале эксперимента ( $^{\circ}\text{C}$ )

In[192]:=

```
tRelative = UnitConvert[ $\frac{t8[[1]] + t2[[1]]}{2}$ , "DegreesCelsius"]
```

[преобразовать единицы 2 измерений]

Out[192]=

33.2  $^{\circ}\text{C}$

Построим распределение температуры по сечению калориметра № 1 на стадии регулярного режима. Выбираем  $\tau[7], \tau[15], \tau[25]$  как три момента времени при наступлении регулярного режима.

In[193]:=

```
t1 $\tau$  = {t8[[7]], t1[[7]], t2[[7]], t1[[7]], t2[[7]]};
t2 $\tau$  = {t8[[15]], t1[[15]], t2[[15]], t1[[15]], t8[[15]]};
t3 $\tau$  = {t8[[25]], t1[[25]], t2[[25]], t1[[25]], t8[[25]]};
r = {-0.02, -0.02 * 0.707, 0, 0.02 * 0.707, 0.02};
```

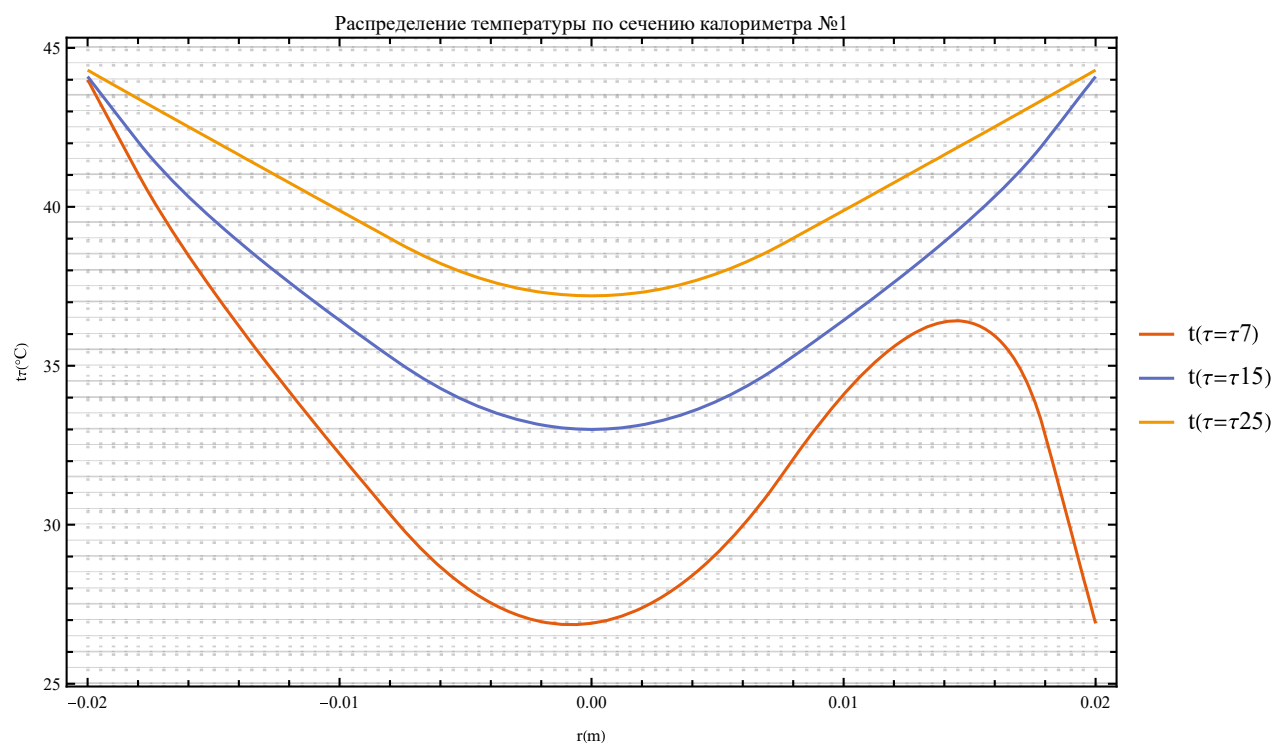
In[208]:=

```

ListLinePlot[
  |линейный график данных
  {Table[{r[[i]], t1τ[[i]]}, {i, 1, Length[t1τ]}], Table[{r[[i]], t2τ[[i]]}, {i, 1, Length[t2τ]}],
    |таблица значений |длина |таблица значений |длина
    Table[{r[[i]], t3τ[[i]]}, {i, 1, Length[t3τ]}], InterpolationOrder → Automatic,
    |таблица значений |длина |порядок интерполяции |автоматический
  PlotLabel → "Распределение температуры по сечению калориметра №1",
    |пометка графика
  PlotTheme → "Scientific", PlotLegends → {"t (τ=τ7)", "t (τ=τ15)", "t (τ=τ25)"},
    |тематический стиль графика |легенды графика
  ImageSize → Large, GridLines → {Range[-0.02, 0.02, 0.0005], Range[25, 45, 0.5]},
    |размер изоб... |круп... |линии координат... |диапазон |диапазон
  Frame → True, FrameLabel → {"r(m)", "tτ(°C)"}
  |рамка |ист... |пометка для обрамления

```

Out[208]=



Определим погрешности измерения тепловых свойств материала( $\lambda$  и  $\alpha$ )

In[196]:=

```

Δt = Quantity[0.1, "DegreesCelsius"];
|размерная величина
Δt1 = Quantity[QuantityMagnitude[t8[[7]] - t1[[7]]], "DegreesCelsius"]
|размерна... |модуль размерной величины

```

Out[196]=

7.6 °C

In[197]:=

```

Δt2 = Quantity[QuantityMagnitude[t8[[35]] - t1[[35]]], "DegreesCelsius"]
|размерна... |модуль размерной величины

```

Out[197]=

1.9 °C

```

In[198]:=

$$\Delta\theta_1 = \frac{\Delta\Delta t}{\Delta t_1}$$

Out[198]=
0.97328584

In[199]:=

$$\Delta\theta_2 = \frac{\Delta\Delta t}{\Delta t_2}$$

Out[199]=
0.99345574

In[200]:=

$$\Delta\theta = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2$$

Out[200]=
1.9667416

In[201]:=

$$\Delta\Delta\tau = 1; \Delta m_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta\theta}{\text{QuantityMagnitude}[\tau[[35]] - \tau[[7]]]}\right)^2 + \left(\frac{\text{Exp}[\ln\theta_1[[7]]] - \text{Exp}[\ln\theta_1[[35]]]}{(\text{QuantityMagnitude}[\tau[[35]] - \tau[[7]]])^2} * \Delta\Delta\tau\right)^2}$$

Out[201]=
0.0014048184

```

Определим погрешность вычисления коэффициента температуропроводности:

```

In[202]:=

$$\delta a = \frac{\Delta m_1}{m_{11}}$$

Out[202]=
1.4187072

```

Табличное значение коэффициента теплопроводности

```

In[203]:=

$$\lambda_{\text{Standard}} = \text{Quantity}\left[0.18, \frac{\text{"Watts"}}{\text{"Meters"} * \text{"Kelvins"}}\right]$$

Out[203]=
0.18 W/ (m K)

```

Разница если не учитывать оболочку:

```

In[204]:=

$$\Delta\lambda_{\text{withBoundryLayerNotIncluded}} = \text{Abs}[\lambda_{\text{Standard}} - \lambda_{\text{withBoundryLayerNotIncluded}}]$$

Out[204]=
0.0099664853 W/ (m K)

```

Найдем погрешность коэффициента теплопроводности в случае если оболочка не учитывается:

```

In[205]:=

$$\delta\lambda_{\text{withBoundryLayerNotIncluded}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{withBoundryLayerNotIncluded}}}{\lambda_{\text{withBoundryLayerNotIncluded}}}$$

Out[205]=
0.058614828

```

Найдем погрешность коэффициента теплопроводности в случае если оболочка учитывается:

In[206]:=

$$\Delta\lambda_{\text{withBoundryLayerIncluded}} = \text{Abs}[\lambda_{\text{Standard}} - \lambda_{\text{withBoundryLayerIncluded}}]$$

абсолютное значение

Out[206]=

0.041343369 W / (m K)

In[207]:=

$$\delta\lambda_{\text{withBoundryLayerIncluded}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{withBoundryLayerIncluded}}}{\lambda_{\text{withBoundryLayerIncluded}}}$$

Out[207]=

0.29817087

**Вывод:**

- 1) Углублены знания о процессе нестационарной теплопроводности в твердых телах. Изучено влияние начального теплового состояния и условий теплообмена тела с окружающей средой на вид распределения температуры в теле.
- 2) Произведено ознакомление с нестационарными методами экспериментального определения теплофизических свойств материалов.
- 3) Освоен метод регулярного теплового режима, его экспериментальная реализация при определении коэффициентов теплопроводности и температуропроводности в условиях нагревания/охлаждения тела.
- 4) Произведен анализ полученных результатов и их сравнение со справочными данными.