

12. Каминская А.В., Гусарова И.Г. Численный анализ режимов работы газораспределительных сетей высокого давления // Радиоэлектроника и информатика. 2011. №3(54). С. 50–54.

13. Гусарова И. Г., Мелиневский Д. В. Численное моделирование переходных режимов течения газа с использованием различных конечно-разностных сеток // Системи обробки інформації. 2017. № 2. С. 29–33,

14. Гусарова И.Г., Соловьев А.М. Применение метода Бройдена при моделировании нестационарных режимов течения газа // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми і перспективи розвитку ІТ-індустрії» : зб. матеріалів форуму (м. Харків, 19-20 квітня 2018 р.). Харків : ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2018. С. 12.

15. Гусарова И.Г., Соловьев А.М. Применение метода Бройдена при моделировании нестационарных режимов течения газа по участку трубопровода // 22-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» : зб. матеріалів форуму (м. Харків, 17-19 квітня 2018 р.). Т. 7. Харків : ХНУРЕ, 2018. С. 110–111,

16. Гусарова І.Г., Соловйов О.М. Результати чисельного моделювання нестационарних режимів з використанням методу Бройдена // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційна безпека та інформаційні технології» : зб. матеріалів форуму (м. Харків, 24-25 квітня 2019 р.). Харків : ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2019. С. 26.

17. Гусарова І.Г., Соловйов О.М. Застосування методу Бройдена при комп'ютерному моделюванні перехідних режимів течії газу // Системи обробки інформації. 2019. № 2(157). С. 33–39.

18. Xiaoyong X., Hongwei Y. A new class of methods with higher order of convergence for solving systems of nonlinear equations // Applied Mathematics and Computation, 2015. № 264. P. 300–309.

ДОДАТОК А

Код програми розрахунку ННРТГ по ДТ з використанням методу Бройдена

```

n = 5; (*число точек разбиения*)
(*рассматриваемая система уравнений:  $\frac{\partial \phi}{\partial t} + B \frac{\partial \phi}{\partial x} = \Phi$ *)
(*матрицы как функции от параметров (W,P,T),
вычисляемые в каждой точке разбиения*)

B[{W_, P_, T_}] :=  $\begin{pmatrix} 2 \alpha S T \frac{W}{P} & 1 - \alpha S T \frac{W^2}{P^2} & 0 \\ \alpha S T & 0 & 0 \\ \frac{(\gamma-1) \alpha S T^2}{P} & 0 & \frac{\gamma \alpha S W T}{P} \end{pmatrix}$ ;

Phi[{W_, P_, T_}] :=  $\begin{pmatrix} -\beta S T \frac{W \text{Abs}[W]}{P} - \frac{g}{\alpha S} \frac{P}{T} D[h[x], x] \\ 0 \\ -\frac{4K(\gamma-1)}{\text{Diam}} * \frac{T}{P} (T - Tgr) - g (\gamma - 1) \frac{PW}{T} D[h[x], x] \end{pmatrix}$ ;

phi[{W_, P_, T_}] :=  $\begin{pmatrix} W \\ P \\ T \end{pmatrix}$ ;

m = Dimensions[phi[{W, P, T}]][[1]]; (*размерность вектора phi*)

(*для теоретических выкладок сформируем вектора переменных,
соответствующих параметрам в каждой точке разбиения
рассматриваемого отрезка*)
WPTmas = {}; (*массив параметров W,
P и T во всех точках разбиения (в символьном виде)*)
For[i = 0, i <= n, i++,
{
AppendTo[WPTmas, {
ToExpression[StringJoin["W", ToString[i]]],
ToExpression[StringJoin["P", ToString[i]]],
ToExpression[StringJoin["T", ToString[i]]]};
}];
Print[
"Вектора параметров W,P и T во всех точках разбиения: ",
WPTmas];

deltaWPTmas = {}; (*массив искоемых поправок к неизвестным
(символьный вид)*)

```

```

For[i = 0, i ≤ n, i++,
{
  AppendTo[δWPTmas, {

    ToExpression[StringJoin["δW", ToString[i]]],

    ToExpression[StringJoin["δP", ToString[i]]],

    ToExpression[StringJoin["δT", ToString[i]]]};

  }];
Print["Вектора поправок к неизвестным:"];
δWPTmas
Вектора параметров W,P и T во всех точках разбиения:
{{W0, P0, T0}, {W1, P1, T1}, {W2, P2, T2},
 {W3, P3, T3}, {W4, P4, T4}, {W5, P5, T5}}
Вектора поправок к неизвестным:
{{δW0, δP0, δT0}, {δW1, δP1, δT1}, {δW2, δP2, δT2},
 {δW3, δP3, δT3}, {δW4, δP4, δT4}, {δW5, δP5, δT5}}
ψmas = {}; (*массив невязок (в символьном виде)*)
For[i = 0, i ≤ n, i++,
{
  Which[i = 0,
  {
    (* WPTmas[[i+1]] - вектор-
    строка параметров:  $(W_i^k, P_i^k, T_i^k)$  *)
    (* φ[WPTmas[[i]]] - вектор-
    столбец параметров:  $\begin{pmatrix} W_{i-1}^k \\ P_{i-1}^k \\ T_{i-1}^k \end{pmatrix}$  *)

    (* φ[WPTmas[[i+1]]] - вектор-столбец параметров:  $\begin{pmatrix} W_i^k \\ P_i^k \\ T_i^k \end{pmatrix}$  *)

    (* φ[WPTmas[[i+2]]] - вектор-
    столбец параметров:  $\begin{pmatrix} W_{i+1}^k \\ P_{i+1}^k \\ T_{i+1}^k \end{pmatrix}$  *)

    (* φ[{W0k1,P0k1,T0k1}] - вектор-
    столбец параметров с предыдущего временного
    слоя:  $\begin{pmatrix} W_i^{k-1} \\ P_i^{k-1} \\ T_i^{k-1} \end{pmatrix}$  *)

    (* B[WPTmas[[i+1]]] -
    матрица B с подставленными в нее параметрами
     $(W_i^k, P_i^k, T_i^k)$  *)
    (* B[WPTmas[[i+1]].φ[WPTmas[[i+1]]] -
    произведение матрицы B и вектора φ*)

```

```

(*  $\Phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
матрица B с подставленными в нее параметрами
 $(W_i^k, P_i^k, T_i^k)$  *)
AppendTo[ $\psi\text{mas}$ ,  $\frac{1}{\tau} \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
 $\frac{1}{\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
 $\frac{1}{\tau} \phi[\{W0k1, P0k1, T0k1\}]$  +
 $\frac{1}{\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i+2]]]$  -
 $\Phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$ ];
},
0 < i < n,
{
AppendTo[ $\psi\text{mas}$ ,  $\frac{1}{\tau} \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
 $\frac{1}{\tau} \phi[\{W1k1, P1k1, T1k1\}]$  +
 $\frac{1}{2\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i+2]]]$  -
 $\frac{1}{2\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i]]]$  -
 $\Phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$ ];
},
i == n,
{
AppendTo[ $\psi\text{mas}$ ,  $\frac{1}{\tau} \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  +
 $\frac{1}{\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
 $\frac{1}{\tau} \phi[\{Wnk1, Pnk1, Tnk1\}]$  -
 $\frac{1}{\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i]]]$  -
 $\Phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$ ];
}
]
}];

```

```
Print["Вектор невязок:"];
```

```
For[i = 1, i ≤ n + 1, i++, Print[ψmas[[i]] // MatrixForm]]
```

Вектор невязок:

$$\left(\begin{array}{l} -\frac{2 S T_0 W_0^2 \alpha_{-P_0} \left(1 - \frac{S T_0 W_0^2 \alpha}{P_0^2}\right)}{\Delta} + \frac{2 S T_0 W_0 W_1 \alpha_{-P_1} \left(1 - \frac{S T_0 W_0^2 \alpha}{P_0^2}\right)}{\Delta} + \frac{W_0}{\alpha} - \frac{W_0 k_1}{\alpha} + \frac{S T_0 W_0 \beta \text{Abs}[W_0]}{P_0} + \frac{g P_0 h'[x]}{S T_0 \alpha} \\ \frac{4 K T_0 (T_0 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_0} - \frac{S T_0^2 W_0 \alpha (-1 + \gamma)}{P_0} - \frac{S T_0^2 W_0 \alpha \gamma}{P_0} + \frac{S T_0^2 W_1 \alpha (-1 + \gamma)}{P_0} - \frac{S T_0 T_1 W_0 \alpha \gamma}{P_0} + \frac{T_0}{\alpha} - \frac{T_0 k_1}{\alpha} + \frac{g P_0 W_0 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_0} \\ -\frac{2 S T_1 W_0 W_1 \alpha_{-P_0} \left(1 - \frac{S T_1 W_1^2 \alpha}{P_1^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{2 S T_1 W_1 W_2 \alpha_{-P_2} \left(1 - \frac{S T_1 W_1^2 \alpha}{P_1^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{W_1}{\alpha} - \frac{W_1 k_1}{\alpha} + \frac{S T_1 W_1 \beta \text{Abs}[W_1]}{P_1} + \frac{g P_1 h'[x]}{S T_1 \alpha} \\ -\frac{S T_1 W_0 \alpha}{2 \Delta} + \frac{S T_1 W_2 \alpha}{2 \Delta} + \frac{P_1}{\alpha} - \frac{P_1 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_1 (T_1 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_1} - \frac{S T_1^2 W_0 \alpha (-1 + \gamma)}{P_1} - \frac{S T_0 T_1 W_1 \alpha \gamma}{P_1} + \frac{S T_1^2 W_2 \alpha (-1 + \gamma)}{P_1} - \frac{S T_1 T_2 W_1 \alpha \gamma}{P_1} + \frac{T_1}{\alpha} - \frac{T_1 k_1}{\alpha} + \frac{g P_1 W_1 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_1} \\ -\frac{2 S T_2 W_1 W_2 \alpha_{-P_1} \left(1 - \frac{S T_2 W_2^2 \alpha}{P_2^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{2 S T_2 W_2 W_3 \alpha_{-P_3} \left(1 - \frac{S T_2 W_2^2 \alpha}{P_2^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{W_2}{\alpha} - \frac{W_2 k_1}{\alpha} + \frac{S T_2 W_2 \beta \text{Abs}[W_2]}{P_2} + \frac{g P_2 h'[x]}{S T_2 \alpha} \\ -\frac{S T_2 W_1 \alpha}{2 \Delta} + \frac{S T_2 W_3 \alpha}{2 \Delta} + \frac{P_2}{\alpha} - \frac{P_2 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_2 (T_2 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_2} - \frac{S T_2^2 W_1 \alpha (-1 + \gamma)}{P_2} - \frac{S T_1 T_2 W_2 \alpha \gamma}{P_2} + \frac{S T_2^2 W_3 \alpha (-1 + \gamma)}{P_2} - \frac{S T_2 T_3 W_2 \alpha \gamma}{P_2} + \frac{T_2}{\alpha} - \frac{T_2 k_1}{\alpha} + \frac{g P_2 W_2 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_2} \\ -\frac{2 S T_3 W_2 W_3 \alpha_{-P_2} \left(1 - \frac{S T_3 W_3^2 \alpha}{P_3^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{2 S T_3 W_3 W_4 \alpha_{-P_4} \left(1 - \frac{S T_3 W_3^2 \alpha}{P_3^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{W_3}{\alpha} - \frac{W_3 k_1}{\alpha} + \frac{S T_3 W_3 \beta \text{Abs}[W_3]}{P_3} + \frac{g P_3 h'[x]}{S T_3 \alpha} \\ -\frac{S T_3 W_2 \alpha}{2 \Delta} + \frac{S T_3 W_4 \alpha}{2 \Delta} + \frac{P_3}{\alpha} - \frac{P_3 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_3 (T_3 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_3} - \frac{S T_3^2 W_2 \alpha (-1 + \gamma)}{P_3} - \frac{S T_2 T_3 W_3 \alpha \gamma}{P_3} + \frac{S T_3^2 W_4 \alpha (-1 + \gamma)}{P_3} - \frac{S T_3 T_4 W_3 \alpha \gamma}{P_3} + \frac{T_3}{\alpha} - \frac{T_3 k_1}{\alpha} + \frac{g P_3 W_3 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_3} \\ -\frac{2 S T_4 W_3 W_4 \alpha_{-P_3} \left(1 - \frac{S T_4 W_4^2 \alpha}{P_4^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{2 S T_4 W_4 W_5 \alpha_{-P_5} \left(1 - \frac{S T_4 W_4^2 \alpha}{P_4^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{W_4}{\alpha} - \frac{W_4 k_1}{\alpha} + \frac{S T_4 W_4 \beta \text{Abs}[W_4]}{P_4} + \frac{g P_4 h'[x]}{S T_4 \alpha} \\ -\frac{S T_4 W_3 \alpha}{2 \Delta} + \frac{S T_4 W_5 \alpha}{2 \Delta} + \frac{P_4}{\alpha} - \frac{P_4 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_4 (T_4 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_4} - \frac{S T_4^2 W_3 \alpha (-1 + \gamma)}{P_4} - \frac{S T_3 T_4 W_4 \alpha \gamma}{P_4} + \frac{S T_4^2 W_5 \alpha (-1 + \gamma)}{P_4} - \frac{S T_4 T_5 W_4 \alpha \gamma}{P_4} + \frac{T_4}{\alpha} - \frac{T_4 k_1}{\alpha} + \frac{g P_4 W_4 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_4} \\ -\frac{2 S T_5 W_4 W_5 \alpha_{-P_4} \left(1 - \frac{S T_5 W_5^2 \alpha}{P_5^2}\right)}{\Delta} + \frac{2 S T_5 W_5^2 \alpha_{-P_5} \left(1 - \frac{S T_5 W_5^2 \alpha}{P_5^2}\right)}{\Delta} + \frac{W_5}{\alpha} - \frac{W_5 k_1}{\alpha} + \frac{S T_5 W_5 \beta \text{Abs}[W_5]}{P_5} + \frac{g P_5 h'[x]}{S T_5 \alpha} \\ -\frac{S T_5 W_4 \alpha}{\Delta} + \frac{S T_5 W_5 \alpha}{\Delta} + \frac{P_5}{\alpha} - \frac{P_5 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_5 (T_5 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_5} - \frac{S T_5^2 W_4 \alpha (-1 + \gamma)}{P_5} - \frac{S T_4 T_5 W_5 \alpha \gamma}{P_5} + \frac{S T_5^2 W_5 \alpha (-1 + \gamma)}{P_5} - \frac{S T_5^2 W_5 \alpha \gamma}{P_5} + \frac{T_5}{\alpha} - \frac{T_5 k_1}{\alpha} + \frac{g P_5 W_5 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_5} \end{array} \right)$$

```

(*создаем матрицу (n+1)x(n+1) (если n=5 => размер 6x6)*)
mass = Array[mas, {n + 1, n + 1}, {0, 0}]; (*массив производных невязок*)
For[i = 0, i ≤ n, i++,
  For[j = 0, j ≤ n, j++,
    {
      (*каждый элемент созданной матрицы производных mass расширим
      матрицей mxm (3x3 - по числу параметров (W,P,T)), и заполним все матрицы нулями*)
      mas[i, j] = ConstantArray[0, {m, m}]; (*обнулим все*)
    }
  ]
]
Abs'[W_] := Abs[W] / W

```

```

For[i = 0, i ≤ n, i++,
  For[j = 0, j ≤ n, j++,
    {
      (* WPTmas[[i+1]] - вектор-строка параметров: (Wik, Pik, Tik) *)
      (* ψmas[[i+1]] - невязка ψik в точке (Wik, Pik, Tik) *)
      (* D[ψmas[[i+1]], WPTmas[[j+1, 1]]] - производная невязки ψik по параметру Wjk - возвращает вектор-
      столбец mx1 (3x1)  $\left( \frac{\partial \psi_{i,1}^k}{\partial W_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,2}^k}{\partial W_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,3}^k}{\partial W_j^k} \right)^T$  *)
      (* D[ψmas[[i+1]], WPTmas[[j+1, 2]]] - производная невязки ψik по параметру Pjk - возвращает вектор-
      столбец mx1 (3x1)  $\left( \frac{\partial \psi_{i,1}^k}{\partial P_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,2}^k}{\partial P_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,3}^k}{\partial P_j^k} \right)^T$  *)
      (* D[ψmas[[i+1]], WPTmas[[j+1, 3]]] - производная невязки ψik по параметру Tjk - возвращает вектор-
      столбец mx1 (3x1)  $\left( \frac{\partial \psi_{i,1}^k}{\partial T_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,2}^k}{\partial T_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,3}^k}{\partial T_j^k} \right)^T$  *)
      (* ArrayFlatten[{{m11, m12, m13}, {m21, m22, m23}}] - mij -
      матрицы. Функция составляет из переданных ей матриц новую следующим образом:
      
$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{pmatrix}$$
 *)
      (* Составляем матрицу производных невязки в точке как  $\left( \frac{\partial \psi_{i,1}^k}{\partial W_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,2}^k}{\partial P_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,3}^k}{\partial T_j^k} \right)$  *)
      mas[i, j] = ArrayFlatten[{{D[ψmas[[i + 1]], WPTmas[[j + 1, 1]]],
        D[ψmas[[i + 1]], WPTmas[[j + 1, 2]]],
        D[ψmas[[i + 1]], WPTmas[[j + 1, 3]]]}}];
    }
  ]
];

```

```

startWorkTime = SessionTime[];

```

```

(*индекс временных слоев*)
k = 0;
(*----- k=0 -----*)
(*-----*)
(*----- Стационарный режим -----*)
(*-----*)
(*СТАЦИОНАРНЫЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТРАНСПОРТА ГАЗА ПО ЛИНЕЙНОМУ УЧАСТКУ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ*)
(*Считается, что участок [0,L] разбит на n частей. Найти давление  $P_{rI}$  и температуру  $t_i$  в каждой
точке участка с координатой  $l_i$ , находящейся от начала участка на расстоянии  $l_i = \frac{l}{n}i$ ,
 $i = \overline{1, n}$  и построить графики давления  $P_{rI}$  и температуры  $t_i$  от  $l_i$ ,  $i = \overline{0, n}$ , где  $l_0 = 0$ ,  $P_{r0} = P_H$ ,  $t_0 = t_H$ ,  $n = 5$ .)
(*Алгоритм расчета стационарного режима транспорта газа*)
(*Расчет параметров газового потока  $P_l$ ,  $t_l$  при стационарном режиме транспорта газа в
точке участка с координатой  $l$ , находящейся на расстоянии  $l$  от начала участка, производится следующим образом. *)
(* 1. Вводим значения используемых величин и начальные данные *)
(*длина участка [км]*)
L = 112;

$$\Delta = \frac{L}{n};$$

(*внутренний диаметр участка газопровода [мм]*)
Diam = 1400;
(*толщина стенок трубы [мм]*)
 $\delta = 10;$ 
(*начало отрезка*)
 $l_0 = 0;$ 
(*давление и температура газа в начале участка [атм.], [°C]*)
 $P_H = 84.6364456;$ 
 $t_H = 40;$ 
(*коэффициент сжимаемости газа*)
 $z_H = 0.9;$ 
(*коммерческий расход [млн. куб. м в сутки]*)
 $q = 102.266;$ 
(*температура грунта [°C]*)
 $t_{gr} = 10;$ 
(*коэффициент теплопередачи от трубы к грунту [ккал/м. куб. ч. К]*)
 $K = 1.4;$ 
(*коэффициент эффективности участка*)
 $E_f = 0.95;$ 
(*поправочный коэффициент, учитывающий отклонение режима течения газа от квадратичного*)
 $\alpha_{coef} = 1;$ 
(*коэффициент, учитывающий влияние подкладных колец*)
 $\phi_{coef} = 1;$ 
(*удельная теплоемкость газа [ккал/кг*К]*)
 $C_p = 0.655952;$ 
(*относительная плотность газа по воздуху*)
 $\Delta var = 0.604707;$ 
(*точность расчета*)
 $\epsilon = 10^{-6};$ 
(*2. Находим наружный диаметр участка газопровода [мм]*)
 $DH = Diam + 2 \delta;$ 

```

```

(*3. Значения давления и температуры в 1-ой точке участка вычисляются по следующему алгоритму:*)
(*3.1*)

$$\theta = \frac{62.6 * K * DH}{Cp * \Delta var * q * 10^6};$$

(*3.2 Переводим в систему единиц СИ:*)
(*(температура из градусов Цельсия в Кельвины)*)
Tgr = trp + 273.15;
TH = tH + 273.15;
(*массовый расход [кг/сек]*)
GSi = q * 13.94676 * \Delta var;
(*площадь сечения [м2])

$$S = \frac{\pi \left(\frac{Diam}{1000}\right)^2}{4};$$

(*удельный массовый расход*)
NSi = \frac{GSi}{S};
(*массивы для вывода результатов (стационарный режим, система СИ, усеченная таблица в системе СИ)*)
masEndRez = {};
masEndRezSi = {};
masEndRezNS = {};
stat = {}; (*массив для передачи в нестационарный режим*)
For [i = 1, i ≤ n, i++,
{
  (*расстояние от начала участка до точки этого участка с координатой l[км]*)
  li = N[\Delta * i];
  zcp = zH;
  rez = {}; (*массив для вывода промежуточных результатов*)
  AppendTo[rez, {"Tl [K]", "tl [°C]", "Tcp [K]", "C", "P1 [атм.]", "Pcp[атм.]", "zcp", "P1Prev",
    "C", "P1 [атм.]", "Abs[P1Prev-P1]"}];
  (*3.3 Температура газа в данной точке участка газопровода находится по формуле:*)
  (*температура газа Tl в точке участка с координатой l,
  находящейся на расстоянии l от начала участка газопровода[K]*)
  (*температура газа tl в точке участка с координатой l,
  находящейся на расстоянии l от начала участка [°C]*)
  Tl = Tgr + (TH - Tgr) E-θ li;
  tl = Tl - 273.15;
  (*3.4 Далее определяем среднюю температуру газа на участке[0,1]:*)
  (*средняя температура транспортируемого газа по длине участка[K]*)
  Tcp = Tgr + (TH - Tgr) * \frac{1 - e-θ li}{θ li};
  (*3.5*)
  
$$c = \frac{\Delta var * li * Tcp * zcp}{\alpha coef^2 * \phi coef^2 * (1.64 * 10^{-6})^2 * Diam^{5.2} * Ef^2};$$

}

```



```

(*3.6 Значение давления находится из формулы*)
(*давление P1 в точке участка с координатой l, находящейся на расстоянии l от начала участка [атм.]*)
P1 =  $\sqrt{PH^2 - c * Abs[q] * q}$ ;
P1Prev = P1 + 100; (*для входа в цикл*)
kf = 0; (*для заполнения первой строки таблицы*)
While[Abs[P1Prev - P1] ≥ ε,
  (*3.7 Находим среднее значение давления газа на участке[0,l]:*)
  Pcp =  $\frac{2}{3} \left( PH + \frac{P1^2}{PH + P1} \right)$ ;
  (*3.8 Средний коэффициент сжимаемости газа по длине участка[0,l]:*)
  zcp = 1 - ((Pcp - 6) (0.345 * 10-2 * Δvar - 0.446 * 10-3) + 0.015) (1.3 - 0.0144 (Tcp - 282.8));

  (*3.9*)
  P1Prev = P1;
(*3.10*)
  c =  $\frac{\Delta var * li * Tcp * zcp}{acoef^2 * \phi coef^2 * (1.64 * 10^{-6})^2 * Diam^{5.2} * Ef^2}$ ;
(*3.11*)
  P1 =  $\sqrt{PH^2 - c * Abs[q] * q}$ ;
  If[kf == 0, AppendTo[rez, {NumberForm[Tl, {6, 3}], NumberForm[tl, {6, 4}], NumberForm[Tcp, {6, 3}],
    NumberForm[c, {7, 6}], NumberForm[P1, {6, 4}], NumberForm[Pcp, {6, 4}], NumberForm[zcp, {7, 6}],
    NumberForm[P1Prev, {6, 4}], NumberForm[c, {7, 6}], NumberForm[P1, {6, 4}], Abs[P1Prev - P1]}],
    AppendTo[rez, {"", "", "", "", "", NumberForm[Pcp, {6, 4}], NumberForm[zcp, {7, 6}],
      NumberForm[P1Prev, {6, 4}], NumberForm[c, {7, 6}], NumberForm[P1, {6, 4}], Abs[P1Prev - P1]}]];
  kf++;
  (*3.12 Если Abs[P1Prev-P1]<ε,то P1 найдено,в противном случае переходим к пункту 3.7*)
  (*3.13 Вывод tl, P1, Tcp, zcp*)
]; (*While*)
(*печатать результатов итерационного процесса*)
(*Print["Результаты в точке №",i," на расстоянии " ,li," км от начала участка:"];*)

AppendTo[masEndRez, {li, GSi, P1, tl}];
AppendTo[masEndRezSi, {1000 * li, GSi, WSi, NumberForm[98066.5 * (P1), 9], Tl}];
AppendTo[masEndRezNS, {1000 * li, WSi, NumberForm[98066.5 * (P1), 9], Tl}];
AppendTo[stat, {WSi, 98066.5 * (P1), Tl}];

(*Print[Grid[rez,Frame→ All,Background→ {None,{1→ LightGray}},Spacings→ {1,1}]];*)
}]; (*For*)

```

```

Print[Style["Стационарный режим:", 18, FontWeight -> Bold]];
Grid[masEndRez, Frame -> All, Dividers -> {True, 2 -> False}, Background -> {None, {LightGray, LightGray}},
  Spacings -> {1, 1}
Print[Style["Перевод в систему СИ:", 18, FontWeight -> Bold]];
Grid[masEndRezSi, Frame -> All, Dividers -> {True, 2 -> False}, Background -> {None, {LightGray, LightGray}},
  Spacings -> {1, 1}
Print[Style["Входные данные для моделирования нестационарного режима:", 18, FontWeight -> Bold]];
Grid[masEndRezNS, Frame -> All, Dividers -> {True, 2 -> False}, Background -> {None, {LightGray, LightGray}},
  Spacings -> {1, 1}

tempoMasStat = stat;
Do[{{tempoMasStat[[i, 1]] = tempoMasStat[[i, 1]] +  $\frac{S}{13.94676 * \Delta var}$ ,
  tempoMasStat[[i, 2]] = tempoMasStat[[i, 2]] / 98066.5,
  tempoMasStat[[i, 3]] = tempoMasStat[[i, 3]] - 273.15}}, {i, 1, n + 1}];

qPlotMas = {};
PplotMas = {};
TplotMas = {};
Do[{AppendTo[qPlotMas, tempoMasStat[[i, 1]]], AppendTo[PplotMas, tempoMasStat[[i, 2]]],
  AppendTo[TplotMas, tempoMasStat[[i, 3]]]}, {i, 1, n + 1}];
Print[
  ListLinePlot[qPlotMas, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"x", "q [млн.куб.м в сутки]"}];
Print[
  ListLinePlot[PplotMas, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"x", "P [атм]"}];
Print[
  ListLinePlot[TplotMas, PlotRange -> {30, 40} (*PlotRange->All*), AxesLabel -> {"x", "t [°C]"}];

(*clear all unnecessary lists*)
Clear[masEndRez, masEndRezSi, masEndRezNS, rez, qPlotMas, PplotMas, TplotMas];

(*-----*)
(*-----*)
(*-----*)

(*длина участка [м]*)
L = L * 1000; (*длина участка*)
l0 = 0; (*начало отрезка*)
 $\Delta = \frac{L - l_0}{n}$ ; (*step= $\frac{L}{n}$  - шаг по иксу*)

(*внутренний диаметр участка газопровода [м]*)
Diam = 1400 / 1000;
(*площадь поперечного сечения трубы [м2])
S =  $\frac{\text{Pi (Diam)}^2}{4}$ ;

(*удельная теплоемкость газа[ккал/кг*К]*)
Cp = 0.655952 * 4186.8;
(*Ускорение свободного падения*)
g = 9.80665;
(*относительная плотность газа по воздуху*)
 $\Delta var = 0.604707$ ;
(*универсальная газовая постоянная*)
R =  $\frac{287}{\Delta var * g}$ ;
(*коэффициент эффективности участка*)
Ef = 0.95;

```

```

λ =  $\frac{0.03817}{(\text{Diam} * 1000)^{0.2} * E f^2}$ ;
h[x_] := 1.; (*глубина залегания трубы*)
(*коэффициент сжимаемости газа*)
z = zcp;
α =  $\frac{z g R}{S}$ ;
β =  $\frac{\lambda \alpha}{2 \text{Diam}}$ ;
γ =  $1. / \left(1. - \frac{z g R}{Cp}\right)$ ;
Tgr = 10. + 273.15; (*температура грунта[K]*)
K = 1.4 * 1.163; (*коэффициент теплопередачи от трубы к грунту[ккал/м.куб.ч.К]*)
τ = 5 * 60; (*шаг по времени - 5 мин*)
time = 12. * 60. * 60.; (*общее время моделирования - 12 часов*)
timeLayersNumber =  $\frac{\text{time}}{\tau}$ ;
ε = 10-6; (*точность расчета*)

(* берем стационарное распределение и корректируем согласно граничным условиям *)
(*граничные условия*)
(*лучше задавать на одной границе давление и температуру, на другой - массовый расход*)
Pfirst = 84.6364456; (*[ати.]*)
PSiFirst = 98066.5 * (Pfirst); (*ати → Па*)
Tfirst = 40.; (*[°C]*)
TSiFirst = Tfirst + 273.15; (*(температура из градусов Цельсия в Кельвины)*)
Glast = 112.266; (*[млн.куб.м в сутки]*)
WSiLast =  $\frac{\text{Glast} * 13.94676 * \Delta var}{S}$ ; (*удельный массовый расход*)

result = Array[res, {n + 1, m}]; (*Матрица поправок к неизвестным (n+1)хm (6х3)*)
grafSiList = {};
(* общее число итераций *)
iterationCount = 0;
AppendTo[grafSiList, Table[{{stat[[i, 1]] *  $\frac{S}{13.94676 * \Delta var}$ ,
stat[[i, 2]] / 98066.5,
stat[[i, 3]] - 273.15}, {i, 1, n + 1}}];
fixStat = stat;
k = 1;

```

```

While[k ≤ timeLayersNumber,
{
  prevLayerResult = fixStat;

  s = 0; (*Индекс итераций внутри временного слоя*)
  ψi = {ε * 10 000};
  While[Max[Abs[ψi]] > ε,
  {
    zψCoeef = {};
    If[s = 0,
    {
      (* заменяем нужные значения соответствующими установленными
      граничными *)
      fixStat[[1, 2]] = PSiFirst;
      fixStat[[1, 3]] = TSiFirst;

      If[k < 40,
      {
        fixStat[[n + 1, 1]] =  $\frac{102.266 * 13.94676 * \Delta var}{S}$ ;
      },
      {
        fixStat[[n + 1, 1]] =  $\frac{112.266 * 13.94676 * \Delta var}{S}$ ;
        (*92.266*)
      }
    ]
  ]
},
{
  (*матрица A*)
  Aall = Array[A, {n + 1, n + 1}, {0, 0}];
  If[s = 1, (* s < 6 *)
  {
    For[i = 0, i ≤ n, i++,
    For[j = 0, j ≤ n, j++,
    {
      Which[i = 0,
      {

```

```

A[i, j] = mas[i, j] /. {
    (*точки с текущего временного слоя с предыдущей
    итерации*)
    (*нулевая точка*)
    WPTmas[[1, 1]] → fixStat[[1, 1]], (*W0k, s-1*)
    WPTmas[[1, 2]] → fixStat[[1, 2]], (*P0k, s-1*)
    WPTmas[[1, 3]] → fixStat[[1, 3]], (*T0k, s-1*)
    (*первая точка*)
    WPTmas[[2, 1]] → fixStat[[2, 1]], (*W1k, s-1*)
    WPTmas[[2, 2]] → fixStat[[2, 2]], (*P1k, s-1*)
    WPTmas[[2, 3]] → fixStat[[2, 3]] (*T1k, s-1*)
};
},
i = n,
{
    A[i, j] = mas[i, j] /. {
        (*точки с текущего временного слоя с предыдущей
        итерации*)
        (*предпоследняя точка*)
        WPTmas[[n, 1]] → fixStat[[n, 1]], (*Wn-1k, s-1*)
        WPTmas[[n, 2]] → fixStat[[n, 2]], (*Pn-1k, s-1*)
        WPTmas[[n, 3]] → fixStat[[n, 3]], (*Tn-1k, s-1*)
        (*последняя точка*)
        WPTmas[[n + 1, 1]] → fixStat[[n + 1, 1]], (*Wnk, s-1*)
        WPTmas[[n + 1, 2]] → fixStat[[n + 1, 2]], (*Pnk, s-1*)
        WPTmas[[n + 1, 3]] → fixStat[[n + 1, 3]] (*Tnk, s-1*)
    };
},
0 < i < n,
{
    A[i, j] = mas[i, j] /. {
        (*точки с текущего временного слоя с предыдущей
        итерации*)
        (*i-1 точка*)
        WPTmas[[i, 1]] → fixStat[[i, 1]], (*Wi-1k, s-1*)
        WPTmas[[i, 2]] → fixStat[[i, 2]], (*Pi-1k, s-1*)
        WPTmas[[i, 3]] → fixStat[[i, 3]], (*Ti-1k, s-1*)
        (*i точка*)
        WPTmas[[i + 1, 1]] → fixStat[[i + 1, 1]], (*Wik, s-1*)
        WPTmas[[i + 1, 2]] → fixStat[[i + 1, 2]], (*Pik, s-1*)
        WPTmas[[i + 1, 3]] → fixStat[[i + 1, 3]], (*Tik, s-1*)
        (*i+1 точка*)
        WPTmas[[i + 2, 1]] → fixStat[[i + 2, 1]], (*Wi+1k, s-1*)
        WPTmas[[i + 2, 2]] → fixStat[[i + 2, 2]], (*Pi+1k, s-1*)
        WPTmas[[i + 2, 3]] → fixStat[[i + 2, 3]] (*Ti+1k, s-1*)
    };
};

```

```

    }
    ](*Which*)
  ](*For[j]*)
];(*For[i]*)

}
]; (* if *)
|
(*корректируем полученные матрицы, чтобы получить уравнения
 $\delta P_0^{k,s} = 0,$ 
 $\delta T_0^{k,s} = 0,$ 
 $\delta W_n^{k,s} = 0$ 
*)
(*Print[
  "Корректируем полученные матрицы с учетом граничных
  условий"];*)
M =  $\begin{pmatrix} 1. & 0. & 0. \\ 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0. & 1. \end{pmatrix};$ 

M[[1]] = A[0, 0][[1]];
Aall[[1, 1]] = M;
M =  $\begin{pmatrix} 1. & 0. & 0. \\ 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0. & 1. \end{pmatrix};$ 
M[[2]] = A[n, n][[2]];
M[[3]] = A[n, n][[3]];
Aall[[n + 1, n + 1]] = M;

For[i = 1, i ≤ n, i++, {
  M =  $\begin{pmatrix} 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. \end{pmatrix};$ 
  M[[1]] = A[0, i][[1]];
  Aall[[1, i + 1]] = M;
}];

For[i = 0, i ≤ n - 1, i++, {
  M =  $\begin{pmatrix} 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. \end{pmatrix};$ 
  M[[2]] = A[n, i][[2]];
  M[[3]] = A[n, i][[3]];
  Aall[[n + 1, i + 1]] = M;
}];

```

```

equations = {};
For[i = 1, i ≤ n + 1, ++i, {
  For[j = 1, j ≤ 3, j++, {
    AppendTo[equations,
      Thread[Sum[Aall[[i, 1]].δWPTmas[[1]], {1, 1, n + 1}][[j]] ==
        ψi[[i]][[j]]]]
  ]
}];

(*for Solve - формируем систему уравнений в нужном виде*)
equa = equations[[1, 1]];
Do[equa = And[equa, equations[[i, 1]], {i, 2, Length[equations]}];
list = {};
For[i = 1, i ≤ Length[WPTmas], i++,
  For[j = 1, j ≤ 3, j++, {
    AppendTo[list, δWPTmas[[i, j]]];
  }]];
solution = Solve[equa, list];
index = 1;

For[i = 1, i ≤ n + 1, i++,
  For[j = 1, j ≤ m, j++,
    {
      result[[i, j]] = solution[[1, index, 2]];
      index++;
    }
  ]];

prevfixStat = fixStat;
(*Рассчитываем новые значения параметров*)
For[i = 1, i ≤ n + 1, i++,
  For[j = 1, j ≤ m, j++,
    {
      fixStat[[i, j]] = fixStat[[i, j]] - result[[i, j]];
      index++;
    }
  ]];

} (*else (if(s≠0))*)
]; (*if (s=0)*)

(*берем данные с предыдущей итерации текущего временного
слоя и с предыдущего временного слоя*)
(*невязухи*)
fK = ψi;
ψi = {};

```

```

For[i = 0, i ≤ n, i++,
{
  Which[i = 0,
  {
    AppendTo[ψi, ψmas[[i + 1]] /. {
      (*точки с текущего временного слоя с предыдущей итерации*)
      (*нулевая точка*)
      WPTmas[[1, 1]] → fixStat[[1, 1]], (*W0k, s-1*)
      WPTmas[[1, 2]] → fixStat[[1, 2]], (*P0k, s-1*)
      WPTmas[[1, 3]] → fixStat[[1, 3]], (*T0k, s-1*)
      (*первая точка*)
      WPTmas[[2, 1]] → fixStat[[2, 1]], (*W1k, s-1*)
      WPTmas[[2, 2]] → fixStat[[2, 2]], (*P1k, s-1*)
      WPTmas[[2, 3]] → fixStat[[2, 3]], (*T1k, s-1*)
      (*нулевая точка с предыдущего временного слоя*)
      φ[{W0k1, P0k1, T0k1}][[1, 1]] → prevLayerResult[[1, 1]],
      (*W0k-1, s-1*)
      φ[{W0k1, P0k1, T0k1}][[2, 1]] → prevLayerResult[[1, 2]],
      (*P0k-1, s-1*)
      φ[{W0k1, P0k1, T0k1}][[3, 1]] → prevLayerResult[[1, 3]]
      (*T0k-1, s-1*)
    }];
  }],
},
0 < i < n,
{
  AppendTo[ψi, ψmas[[i + 1]] /. {
    (*точки с текущего временного слоя с предыдущей итерации*)
    (*(i-1) точка*)
    WPTmas[[i, 1]] → fixStat[[i, 1]], (*Wi-1k, s-1*)
    WPTmas[[i, 2]] → fixStat[[i, 2]], (*Pi-1k, s-1*)
    WPTmas[[i, 3]] → fixStat[[i, 3]], (*Ti-1k, s-1*)
    (*i точка*)
    WPTmas[[i + 1, 1]] → fixStat[[i + 1, 1]], (*Wik, s-1*)
    WPTmas[[i + 1, 2]] → fixStat[[i + 1, 2]], (*Pik, s-1*)
    WPTmas[[i + 1, 3]] → fixStat[[i + 1, 3]], (*Tik, s-1*)
    (*(i+1) точка*)
    WPTmas[[i + 2, 1]] → fixStat[[i + 2, 1]], (*Wi+1k, s-1*)
    WPTmas[[i + 2, 2]] → fixStat[[i + 2, 2]], (*Pi+1k, s-1*)
    WPTmas[[i + 2, 3]] → fixStat[[i + 2, 3]], (*Ti+1k, s-1*)
    (*i-я точка с предыдущего временного слоя*)
    φ[{Wik1, Pik1, Tik1}][[1, 1]] → prevLayerResult[[i + 1, 1]],
    (*Wik-1, s-1*)
    φ[{Wik1, Pik1, Tik1}][[2, 1]] → prevLayerResult[[i + 1, 2]],
    (*Pik-1, s-1*)
    φ[{Wik1, Pik1, Tik1}][[3, 1]] → prevLayerResult[[i + 1, 3]]
    (*Tik-1, s-1*)
  }];
}];

```



```

    });
},
i = n,
{
  AppendTo[ψi, ψmas[[i + 1]] /. {
    (*точки с текущего временного слоя с предыдущей итерации*)
    (*предпоследняя точка*)
    WPTmas[[n, 1]] → fixStat[[n, 1]], (*Wn-1k, s-1*)
    WPTmas[[n, 2]] → fixStat[[n, 2]], (*Pn-1k, s-1*)
    WPTmas[[n, 3]] → fixStat[[n, 3]], (*Tn-1k, s-1*)
    (*последняя точка*)
    WPTmas[[n + 1, 1]] → fixStat[[n + 1, 1]], (*Wnk, s-1*)
    WPTmas[[n + 1, 2]] → fixStat[[n + 1, 2]], (*Pnk, s-1*)
    WPTmas[[n + 1, 3]] → fixStat[[n + 1, 3]], (*Tnk, s-1*)
    (*последняя точка с предыдущего временного слоя*)
    φ[{Wnk1, Pnk1, Tnk1}][[1, 1]] → prevLayerResult[[n + 1, 1]],
    (*Wnk-1, s-1*)
    φ[{Wnk1, Pnk1, Tnk1}][[2, 1]] → prevLayerResult[[n + 1, 2]],
    (*Pnk-1, s-1*)
    φ[{Wnk1, Pnk1, Tnk1}][[3, 1]] → prevLayerResult[[n + 1, 3]]
    (*Tnk-1, s-1*)
  }];
}
];
}];

(* Поправки*)
ψi[[1, 2]] = {0.};
ψi[[1, 3]] = {0.};
ψi[[n + 1, 1]] = {0.};

fKplus1 = ψi;
If[s ≠ 0,
{
  δk = result;

  (*Рассчитываем евклидову норму поправок к невест. в квадрате*)
  нормаδkv2 = Sum[Abs[δk[[i]].δk[[i]]], {i, n + 1}];

```

```

For[i = 0, i ≤ n, i++,
{
  Bvs = {{0.}, {0.}, {0.}};
  For[js = 0, js ≤ n, js++,
    Bvs = Bvs + A[i, js].δk[[js + 1]];
  ];
  Bvs = fKplus1[[i + 1]] - fK[[i + 1]] + Bvs;
  For[j = 0, j ≤ n, j++,
    {
      (*Пересчет аппроксимации матрицы Якоби*)
      A[i, j] = A[i, j] -  $\frac{\text{Outer}[\text{Times}, \text{Flatten}[\text{Bvs}], \delta k[[j + 1]]]}{\text{норма}\delta k^2}$ ;
    }
  ];
}];
]; (* If (* s≠0&& s≠1*) *)

s++;
}];

Print["На данном временном слое (k = ", k, ") получим:"];
tempoMas = fixStat;
Do[{tempoMas[[i, 1]] = tempoMas[[i, 1]] *  $\frac{S}{13.94676 + \Delta var}$ ,
  tempoMas[[i, 2]] = tempoMas[[i, 2]] / 98066.5,
  tempoMas[[i, 3]] = tempoMas[[i, 3]] - 273.15}, {i, 1, n + 1}];
Print["В системе единиц стационарного режима"];
Print[NumberForm[tempoMas // MatrixForm, 9]];
AppendTo[grafSiList, tempoMas];
Print[fixStat // MatrixForm];
Print["s = ", s - 1];
k++;
}]; While[k]

totalWorkTime = SessionTime[] - startWorkTime;

Print["Время, затраченное на все расчеты и вывод результатов: без графиков ",
  totalWorkTime, " сек = ", N[totalWorkTime/60], " мин."];

```

```
Print["(*----- Графики -----*)"];
For[j = 1, j ≤ n + 1, j++,
{
qPlotMas = {};
PplotMas = {};
TplotMas = {};
Do[{AppendTo[qPlotMas, grafSiList[[i, j, 1]]],
AppendTo[PplotMas, grafSiList[[i, j, 2]]], AppendTo[TplotMas, grafSiList[[i, j, 3]]]},
{i, 1, timeLayersNumber}];
Print["(*----- Результаты в ", j - 1,
" точке разбиения -----*)"];
Print[
ListLinePlot[qPlotMas, PlotRange → {All, All},
AxesLabel → {"k", "q [млн.куб.м в сутки]", PlotStyle → Thick}];
Print[
ListLinePlot[PplotMas, PlotRange → All, AxesLabel → {"k", "P [атм]"},
PlotStyle → Thick];
Print[
ListLinePlot[TplotMas, PlotRange → All, AxesLabel → {"k", "t [°C]"},
PlotStyle → Thick];
}];
```

```
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 1]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
AxesLabel → {"x, точка разбиття", "t, часовой шар", "q [млн.куб.м на добу]"},
PlotStyle → {Transparent}]
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 2]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
AxesLabel → {"x, точка разбиття", "t, часовой шар", "p [атм]"},
PlotStyle → {Transparent}]
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 3]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
AxesLabel → {"x, точка разбиття", "t, часовой шар", "T [°C]"},
PlotStyle → {Transparent}]
```

```
totalWorkTime = SessionTime[] - startWorkTime;
```

```
Print["Общее время, затраченное на все расчеты и вывод результатов: ",
totalWorkTime, " сек = ", N[totalWorkTime / 60], " мин."];
```

```
(*-----
```

Стационар -----*)

Значения входных параметров:

Число точек разбиения: $n = 5$;

Количество рассматриваемых параметров: $m = 3$;

Начало участка: $l_0 = 0$ км;

Длина участка: $L = 112$ км;

Шаг по иксу: $\Delta_x = 22.4$ км;

Внутренний диаметр участка газопровода: $D = 1400$. мм;

Площадь поперечного сечения трубы: $S = 1.53938$ м²;

Давление газа в начале участка: $P_n = 84.6364$ атм.;

Температура газа в начале участка: $t_n = 40$ °C;

Коммерческий расход: $q = 102.266$ млн. м³ в сутки;

Удельная теплоемкость газа: $C_p = 0.655952 \frac{\text{ккал}}{\text{кгК}}$;

Толщина стенок трубы: $\delta = 10$ мм;

Относительная плотность газа по воздуху: $\Delta = 0.604707$;

Коэффициент эффективности участка: $E = 0.95$;

Температура грунта: $t_{rp} = 10$. °C;

Коэффициент теплопередачи от трубы к грунту: $K = 1.4 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{чК}}$;

Коэффициент сжимаемости газа в начале участка: $z_n = 0.9$;

Поправочный коэффициент, учитывающий отклонение режима течения газа от квадратичного: $\alpha = 1$;

Коэффициент, учитывающий влияние подкладных колец: $\phi = 1$;

Точность расчета: $\epsilon = 1 \cdot 10^{-6}$

Обозначения:

T_1 – температура газа в точке участка с

координатой l , находящейся на расстоянии l от начала участка газопровода [K]

t_1 – температура газа в точке участка с координатой l , находящейся на расстоянии l от начала участка [$^{\circ}$ C]

$T_{ср}$ – средняя температура транспортируемого газа по длине участка [K]

P_1 – давление в точке участка с координатой l , находящейся на расстоянии l от начала участка [атм.]

$P_{ср}$ – среднее значение давления газа на участке [0,1]

$z_{ср}$ – средний коэффициент сжимаемости газа по длине участка [0,1]

P_{1Prev} – промежуточная переменная, равная значению P_1

Стационарный режим:

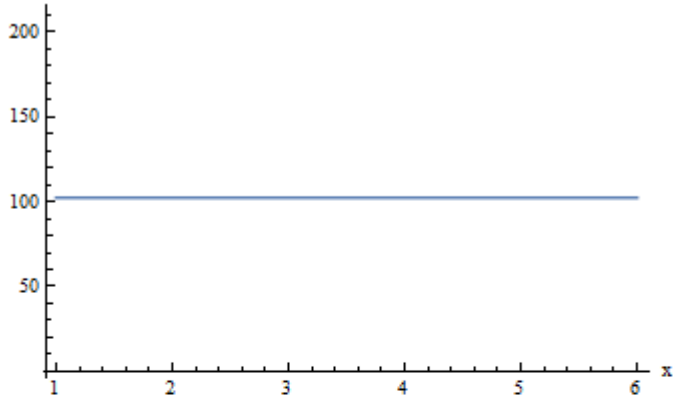
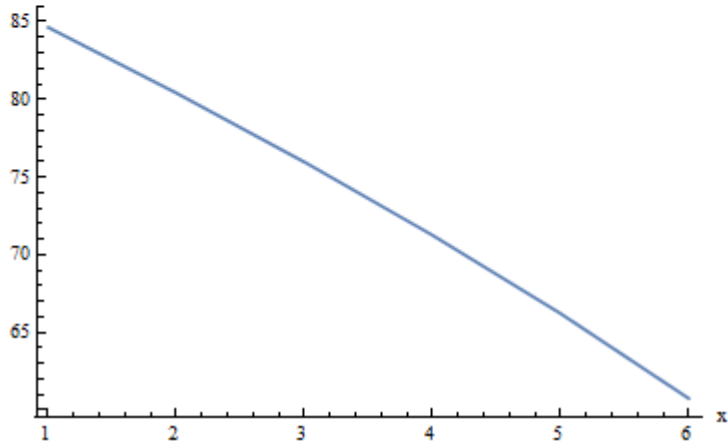
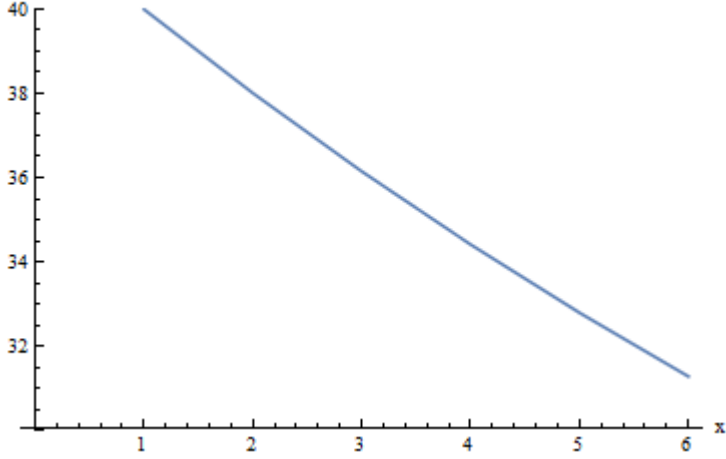
Точка участка l_i [км]	Массовый расход G [кг/сек]	Давление P [атм]	Температура t [$^{\circ}$ C]
0	862.481	84.6364	40
22.4	862.481	80.4114	38.0076
44.8	862.481	75.9672	36.1475
67.2	862.481	71.2563	34.411
89.6	862.481	66.214	32.7898
112.	862.481	60.749	31.2763

Перевод в систему СИ:

Точка участка l_i [м]	Массовый расход G [кг/сек]	Удельный массовый расход W	Давление P [ПА]	Температура t [K]
0	862.481	560.278	8.29999999×10^6	313.15
22400.	862.481	560.278	7.88566005×10^6	311.158
44800.	862.481	560.278	7.44984188×10^6	309.298
67200.	862.481	560.278	6.98785567×10^6	307.561
89600.	862.481	560.278	6.49337234×10^6	305.94
112000.	862.481	560.278	5.95743955×10^6	304.426

Входные данные для моделирования нестационарного режима:

Точка участка l_i [м]	Удельный массовый расход W	Давление P [ПА]	Температура t [K]
0	560.278	8.29999999×10^6	313.15
22400.	560.278	7.88566005×10^6	311.158
44800.	560.278	7.44984188×10^6	309.298
67200.	560.278	6.98785567×10^6	307.561
89600.	560.278	6.49337234×10^6	305.94
112000.	560.278	5.95743955×10^6	304.426

q [млн.куб.м в сутки] P [атм] t [°C]

(* -----)

Нестационар ----- *

Значения входных параметров:

Число точек разбиения: $n = 5$;

Начало участка: $l_0 = 0$ м;

Длина участка: $L = 112000$ м;

Шаг по иксу: $\Delta x = 22400$ м;

Шаг по времени: $\tau = 300$ сек;

Общее время моделирования: $time = 43200$ сек;

Количество временных слоев: $timeLayersNumber = 144$;

Внутренний диаметр участка газопровода: $D = 1.4$ м;

Площадь поперечного сечения трубы: $S = 1.53938$ м²;

Удельная теплоемкость газа: $C_p = 2746.34 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$;

Ускорение свободного падения: $g = 9.80665 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$;

Относительная плотность газа по воздуху: $\Delta = 0.604707$;

Универсальная газовая постоянная: $R = 48.3968$;

Коэффициент эффективности участка: $E = 0.95$;

Коэффициент гидравлического сопротивления: $\lambda = 0.00993229$;

Глубина залегания трубы: $h(x) = 1$;

Температура грунта $T_{гр} = 283.15$ К;

Коэффициент теплопередачи от трубы к грунту $K = 1.6282 \frac{\text{Дж}}{\text{SuperscriptBox[m, 3] сек К}}$;

Коэффициент сжимаемости газа: $z = 0.883398$;

Коэффициенты: $\alpha = 272.362$;

$\beta = 0.966137$;

$\gamma = 1.18017$;

Точность расчета $\epsilon = 1. \times 10^{-6}$

Граничные условия: $P_0 = 8.3 \times 10^6$ Па; $T_0 = 313.15$ К; $W_n = 615.064 \frac{\text{кг}}{\text{сек м}^2}$.

На данном временном слое ($k = 1$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 104.393746 & 84.6364456 & 40. \\ 103.710498 & 80.4330745 & 38.0301991 \\ 103.948737 & 75.9655545 & 36.1560547 \\ 103.745354 & 71.2629963 & 34.4203464 \\ 103.809875 & 66.2849734 & 32.845742 \\ 102.266 & 60.8964794 & 31.407071 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 571.935 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 568.192 & 7.88779 \times 10^6 & 311.18 \\ 569.497 & 7.44968 \times 10^6 & 309.306 \\ 568.383 & 6.98851 \times 10^6 & 307.57 \\ 568.736 & 6.50034 \times 10^6 & 305.996 \\ 560.278 & 5.9719 \times 10^6 & 304.557 \end{pmatrix}$$

$s = 3$

На данном временном слое ($k = 2$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 104.30902 & 84.6364456 & 40. \\ 103.735179 & 80.4490091 & 38.0474677 \\ 103.982569 & 75.9743956 & 36.1719715 \\ 103.552953 & 71.2875689 & 34.4408018 \\ 103.473251 & 66.3467499 & 32.8863968 \\ 102.266 & 61.011855 & 31.49809 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 571.471 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 568.327 & 7.88935 \times 10^6 & 311.197 \\ 569.683 & 7.45054 \times 10^6 & 309.322 \\ 567.329 & 6.99092 \times 10^6 & 307.591 \\ 566.892 & 6.50639 \times 10^6 & 306.036 \\ 560.278 & 5.98322 \times 10^6 & 304.648 \end{pmatrix}$$

$s = 3$

На данном временном слое ($k = 20$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.668601 & 84.6364456 & 40. \\ 102.583184 & 80.5791035 & 38.0882749 \\ 102.605811 & 76.1786051 & 36.2557199 \\ 102.47506 & 71.6808423 & 34.6749885 \\ 102.408764 & 66.7934222 & 33.0230529 \\ 102.266 & 61.6747035 & 31.647918 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 562.484 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 562.016 & 7.90211 \times 10^6 & 311.238 \\ 562.14 & 7.47057 \times 10^6 & 309.406 \\ 561.423 & 7.02949 \times 10^6 & 307.825 \\ 561.06 & 6.5502 \times 10^6 & 306.173 \\ 560.278 & 6.04822 \times 10^6 & 304.798 \end{pmatrix}$$

$s = 2$

На данном временном слое ($k = 39$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.337265 & 84.6364456 & 40. \\ 102.325425 & 80.6050587 & 38.0995437 \\ 102.326346 & 76.2232361 & 36.1870759 \\ 102.306698 & 71.7620713 & 34.5522249 \\ 102.292966 & 66.8829093 & 32.947217 \\ 102.266 & 61.7941239 & 31.5376119 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 560.669 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 560.604 & 7.90466 \times 10^6 & 311.25 \\ 560.609 & 7.47495 \times 10^6 & 309.337 \\ 560.501 & 7.03746 \times 10^6 & 307.702 \\ 560.426 & 6.55897 \times 10^6 & 306.097 \\ 560.278 & 6.05993 \times 10^6 & 304.688 \end{pmatrix}$$

$s = 2$

На данном временном слое ($k = 3$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 104.150593 & 84.6364456 & 40. \\ 103.660354 & 80.4619525 & 38.0609344 \\ 103.885434 & 75.9886807 & 36.1905226 \\ 103.365942 & 71.3200239 & 34.4657503 \\ 103.21279 & 66.3995546 & 32.9153478 \\ 102.266 & 61.102357 & 31.5596915 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 570.603 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 567.917 & 7.89062 \times 10^6 & 311.211 \\ 569.15 & 7.45194 \times 10^6 & 309.341 \\ 566.304 & 6.99411 \times 10^6 & 307.616 \\ 565.465 & 6.51157 \times 10^6 & 306.065 \\ 560.278 & 5.99209 \times 10^6 & 304.71 \end{pmatrix}$$

$s = 3$

На данном временном слое ($k = 38$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.344079 & 84.6364456 & 40. \\ 102.330811 & 80.6045256 & 38.0984985 \\ 102.332146 & 76.2223274 & 36.1862172 \\ 102.310373 & 71.7604603 & 34.5578233 \\ 102.295384 & 66.8809553 & 32.9536332 \\ 102.266 & 61.7915465 & 31.5444631 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 560.706 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 560.633 & 7.9046 \times 10^6 & 311.248 \\ 560.64 & 7.47486 \times 10^6 & 309.336 \\ 560.521 & 7.0373 \times 10^6 & 307.708 \\ 560.439 & 6.55878 \times 10^6 & 306.104 \\ 560.278 & 6.05968 \times 10^6 & 304.694 \end{pmatrix}$$

$s = 2$

На данном временном слое ($k = 40$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.49727 & 84.6364456 & 40. \\ 102.678291 & 80.5915471 & 38.0947447 \\ 102.774038 & 76.1604908 & 36.1473129 \\ 103.971642 & 71.6595221 & 34.4911883 \\ 104.899236 & 66.485052 & 32.6632601 \\ 112.266 & 61.0912731 & 30.9862941 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 561.545 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 562.537 & 7.90333 \times 10^6 & 311.245 \\ 563.061 & 7.46879 \times 10^6 & 309.297 \\ 569.623 & 7.0274 \times 10^6 & 307.641 \\ 574.705 & 6.51996 \times 10^6 & 305.813 \\ 615.064 & 5.99101 \times 10^6 & 304.136 \end{pmatrix}$$

$s = 4$

На данном временном слое ($k = 41$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.842827 & 84.6364456 & 40. \\ 103.225337 & 80.5632408 & 38.0853427 \\ 103.422665 & 76.0652152 & 36.0918254 \\ 105.189581 & 71.5059554 & 34.4071568 \\ 106.606007 & 66.1458412 & 32.4603142 \\ 112.266 & 60.5519169 & 30.6177776 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 563.438 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 565.534 & 7.90056 \times 10^6 & 311.235 \\ 566.615 & 7.45945 \times 10^6 & 309.242 \\ 576.295 & 7.01234 \times 10^6 & 307.557 \\ 584.055 & 6.48669 \times 10^6 & 305.61 \\ 615.064 & 5.93811 \times 10^6 & 303.768 \end{pmatrix}$$

$s = 4$

На данном временном слое ($k = 43$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 103.874485 & 84.6364456 & 40. \\ 104.480152 & 80.4800039 & 38.065729 \\ 104.786166 & 75.8459354 & 35.984893 \\ 106.768495 & 71.1580832 & 34.2372834 \\ 108.422847 & 65.5861908 & 32.2047257 \\ 112.266 & 59.7507656 & 30.1934795 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 569.09 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 572.409 & 7.89239 \times 10^6 & 311.216 \\ 574.085 & 7.43795 \times 10^6 & 309.135 \\ 584.946 & 6.97822 \times 10^6 & 307.387 \\ 594.009 & 6.43181 \times 10^6 & 305.355 \\ 615.064 & 5.85955 \times 10^6 & 303.343 \end{pmatrix}$$

$s = 3$

На данном временном слое ($k = 50$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 107.472863 & 84.6364456 & 40. \\ 107.948209 & 80.1877366 & 38.1021634 \\ 108.175256 & 75.2196359 & 35.9098502 \\ 109.397397 & 70.1762147 & 33.960053 \\ 110.462215 & 64.3125854 & 31.9950873 \\ 112.266 & 58.1173278 & 29.9379509 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 588.805 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 591.409 & 7.86373 \times 10^6 & 311.252 \\ 592.653 & 7.37653 \times 10^6 & 309.06 \\ 599.348 & 6.88194 \times 10^6 & 307.11 \\ 605.182 & 6.30691 \times 10^6 & 305.145 \\ 615.064 & 5.69936 \times 10^6 & 303.088 \end{pmatrix}$$

$s = 3$

На данном временном слое ($k = 42$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 103.321761 & 84.6364456 & 40. \\ 103.847194 & 80.5245072 & 38.0747225 \\ 104.115221 & 75.9568931 & 36.0352569 \\ 106.080819 & 71.3334225 & 34.3194663 \\ 107.692738 & 65.8494953 & 32.3128007 \\ 112.266 & 60.1164787 & 30.366463 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 566.062 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 568.941 & 7.89676 \times 10^6 & 311.225 \\ 570.409 & 7.44883 \times 10^6 & 309.185 \\ 581.178 & 6.99542 \times 10^6 & 307.469 \\ 590.009 & 6.45763 \times 10^6 & 305.463 \\ 615.064 & 5.89541 \times 10^6 & 303.516 \end{pmatrix}$$

$s = 3$

На данном временном слое ($k = 44$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 104.454803 & 84.6364456 & 40. \\ 105.092445 & 80.433285 & 38.0600776 \\ 105.411889 & 75.7377138 & 35.9440428 \\ 107.324655 & 70.9878933 & 34.1647018 \\ 108.942601 & 65.3495848 & 32.1258321 \\ 112.266 & 59.4346355 & 30.0751341 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 572.27 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 575.763 & 7.88781 \times 10^6 & 311.21 \\ 577.513 & 7.42733 \times 10^6 & 309.094 \\ 587.993 & 6.96153 \times 10^6 & 307.315 \\ 596.857 & 6.40861 \times 10^6 & 305.276 \\ 615.064 & 5.82855 \times 10^6 & 303.225 \end{pmatrix}$$

$s = 3$

На данном временном слое ($k = 60$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 110.145437 & 84.6364456 & 40. \\ 110.365396 & 79.9649541 & 38.220006 \\ 110.449181 & 74.7641179 & 36.2543947 \\ 110.990429 & 69.4552455 & 34.2194528 \\ 111.458535 & 63.4134332 & 32.3211674 \\ 112.266 & 56.9929053 & 30.4401222 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 603.447 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 604.652 & 7.84188 \times 10^6 & 311.37 \\ 605.111 & 7.33186 \times 10^6 & 309.404 \\ 608.076 & 6.81123 \times 10^6 & 307.369 \\ 610.641 & 6.21873 \times 10^6 & 305.471 \\ 615.064 & 5.58909 \times 10^6 & 303.59 \end{pmatrix}$$

$s = 3$

На данном временном слое ($k = 70$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 111.296771 & 84.6364456 & 40. \\ 111.405012 & 79.8672593 & 38.2066477 \\ 111.433421 & 74.5661741 & 36.4951239 \\ 111.679662 & 69.1335803 & 34.6629745 \\ 111.886543 & 63.0048992 & 32.8338167 \\ 112.266 & 56.4736415 & 31.0931189 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 609.754 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 610.347 & 7.8323 \times 10^6 & 311.357 \\ 610.503 & 7.31244 \times 10^6 & 309.645 \\ 611.852 & 6.77969 \times 10^6 & 307.813 \\ 612.986 & 6.17867 \times 10^6 & 305.984 \\ 615.064 & 5.53817 \times 10^6 & 304.243 \end{pmatrix}$$

$$s = 3$$

На данном временном слое ($k = 90$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.064212 & 84.6364456 & 40. \\ 112.086781 & 79.8015694 & 38.1854706 \\ 112.093431 & 74.4353288 & 36.4656045 \\ 112.147407 & 68.9228725 & 34.9040116 \\ 112.18772 & 62.7328102 & 33.3747082 \\ 112.266 & 56.1174918 & 31.9137111 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 613.959 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 614.083 & 7.82586 \times 10^6 & 311.335 \\ 614.119 & 7.29961 \times 10^6 & 309.616 \\ 614.415 & 6.75902 \times 10^6 & 308.054 \\ 614.636 & 6.15199 \times 10^6 & 306.525 \\ 615.064 & 5.50325 \times 10^6 & 305.064 \end{pmatrix}$$

$$s = 2$$

На данном временном слое ($k = 110$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.222575 & 84.6364456 & 40. \\ 112.227057 & 79.7879603 & 38.2239584 \\ 112.228516 & 74.4068712 & 36.5130831 \\ 112.238914 & 68.8773048 & 34.9260927 \\ 112.249227 & 62.6767782 & 33.3836118 \\ 112.266 & 56.0461769 & 32.0117902 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 614.827 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 614.851 & 7.82453 \times 10^6 & 311.374 \\ 614.859 & 7.29682 \times 10^6 & 309.663 \\ 614.916 & 6.75456 \times 10^6 & 308.076 \\ 614.973 & 6.14649 \times 10^6 & 306.534 \\ 615.064 & 5.49625 \times 10^6 & 305.162 \end{pmatrix}$$

$$s = 2$$

На данном временном слое ($k = 80$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 111.821396 & 84.6364456 & 40. \\ 111.872629 & 79.8224002 & 38.1700532 \\ 111.88506 & 74.4772773 & 36.5020213 \\ 111.999352 & 68.9887645 & 34.8884635 \\ 112.089267 & 62.8171838 & 33.2271225 \\ 112.266 & 56.2289697 & 31.6279647 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 612.629 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 612.909 & 7.8279 \times 10^6 & 311.32 \\ 612.977 & 7.30373 \times 10^6 & 309.652 \\ 613.604 & 6.76549 \times 10^6 & 308.038 \\ 614.096 & 6.16026 \times 10^6 & 306.377 \\ 615.064 & 5.51418 \times 10^6 & 304.778 \end{pmatrix}$$

$$s = 2$$

На данном временном слое ($k = 100$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.173627 & 84.6364456 & 40. \\ 112.183741 & 79.7921691 & 38.2150395 \\ 112.186625 & 74.4155673 & 36.483968 \\ 112.211425 & 68.8919194 & 34.8935779 \\ 112.231515 & 62.6949057 & 33.3806914 \\ 112.266 & 56.068633 & 31.99574 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 614.558 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 614.614 & 7.82494 \times 10^6 & 311.365 \\ 614.63 & 7.29767 \times 10^6 & 309.634 \\ 614.765 & 6.75599 \times 10^6 & 308.044 \\ 614.876 & 6.14827 \times 10^6 & 306.531 \\ 615.064 & 5.49845 \times 10^6 & 305.146 \end{pmatrix}$$

$$s = 2$$

На данном временном слое ($k = 120$) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.245665 & 84.6364456 & 40. \\ 112.24702 & 79.7859742 & 38.2232271 \\ 112.248546 & 74.403014 & 36.5149009 \\ 112.252713 & 68.8708092 & 34.9579767 \\ 112.257421 & 62.6677316 & 33.4109402 \\ 112.266 & 56.034827 & 32.0355776 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 614.953 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 614.96 & 7.82433 \times 10^6 & 311.373 \\ 614.969 & 7.29644 \times 10^6 & 309.665 \\ 614.992 & 6.75392 \times 10^6 & 308.108 \\ 615.017 & 6.14561 \times 10^6 & 306.561 \\ 615.064 & 5.49514 \times 10^6 & 305.186 \end{pmatrix}$$

$$s = 2$$

На данном временном слое (k = 130) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.256741 & 84.6364456 & 40. \\ 112.256775 & 79.7850213 & 38.2283779 \\ 112.258073 & 74.4009496 & 36.506627 \\ 112.260089 & 68.8679997 & 34.962098 \\ 112.262112 & 62.6634972 & 33.4298539 \\ 112.266 & 56.0292934 & 32.0596123 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 615.014 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 615.014 & 7.82424 \times 10^6 & 311.378 \\ 615.021 & 7.29624 \times 10^6 & 309.657 \\ 615.032 & 6.75364 \times 10^6 & 308.112 \\ 615.043 & 6.14519 \times 10^6 & 306.58 \\ 615.064 & 5.4946 \times 10^6 & 305.21 \end{pmatrix}$$

s = 1

На данном временном слое (k = 140) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.261538 & 84.6364456 & 40. \\ 112.261539 & 79.7846083 & 38.2359902 \\ 112.26208 & 74.3997805 & 36.5085053 \\ 112.263254 & 68.8665734 & 34.9570842 \\ 112.26437 & 62.6616181 & 33.4308351 \\ 112.266 & 56.0269291 & 32.0678929 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 615.04 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 615.04 & 7.8242 \times 10^6 & 311.386 \\ 615.043 & 7.29613 \times 10^6 & 309.659 \\ 615.049 & 6.7535 \times 10^6 & 308.107 \\ 615.056 & 6.14501 \times 10^6 & 306.581 \\ 615.064 & 5.49436 \times 10^6 & 305.218 \end{pmatrix}$$

s = 1

На данном временном слое (k = 144) получим:

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.262524 & 84.6364456 & 40. \\ 112.262634 & 79.7845232 & 38.2377632 \\ 112.262905 & 74.3995122 & 36.5115051 \\ 112.263826 & 68.8661837 & 34.9571461 \\ 112.264764 & 62.6611624 & 33.4296764 \\ 112.266 & 56.0264055 & 32.068003 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 615.045 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 615.046 & 7.82419 \times 10^6 & 311.388 \\ 615.047 & 7.2961 \times 10^6 & 309.662 \\ 615.053 & 6.75347 \times 10^6 & 308.107 \\ 615.058 & 6.14496 \times 10^6 & 306.58 \\ 615.064 & 5.49431 \times 10^6 & 305.218 \end{pmatrix}$$

s = 1

Время, затраченное на все расчеты и вывод результатов: без графиков

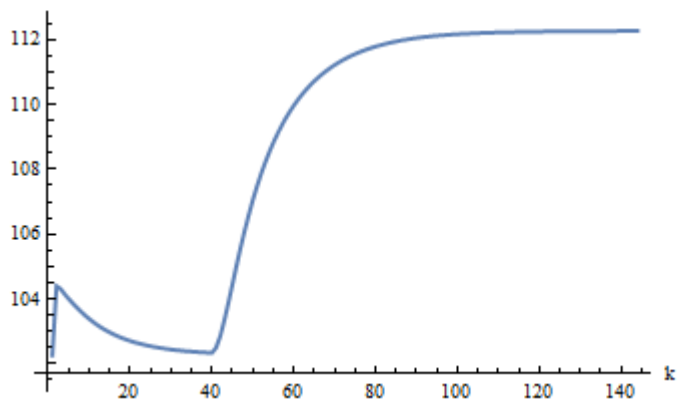
10.6562016 сек = 0.177603 мин.

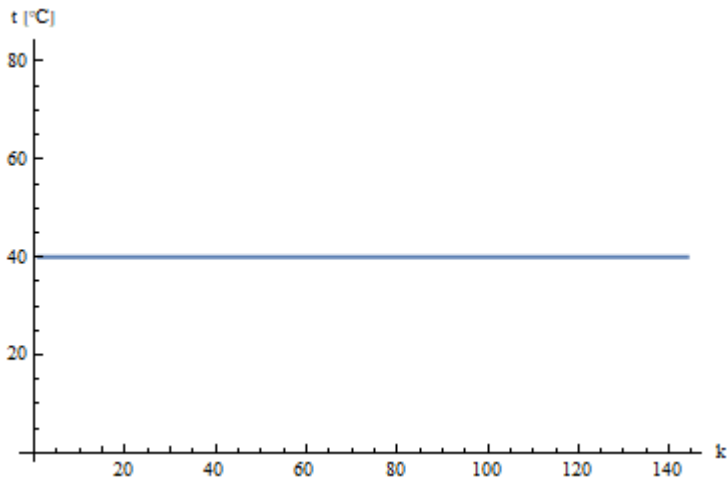
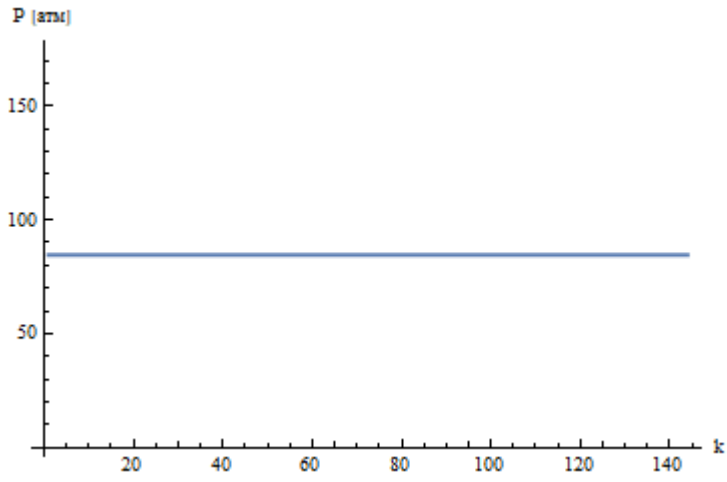
(*----- Графики -----*)

(*----- Результаты в

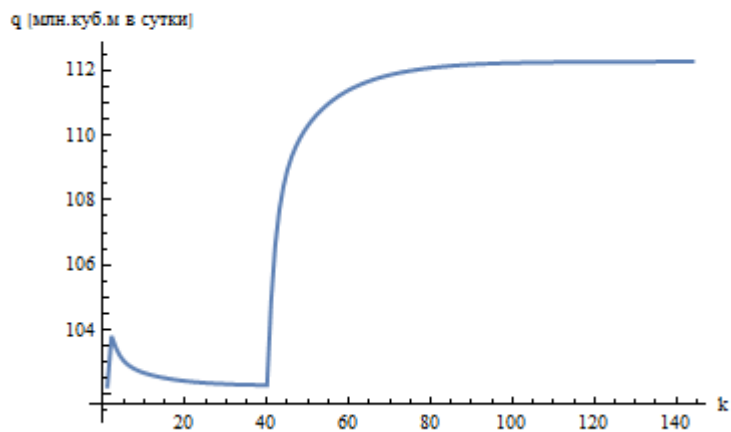
0 точке разбиения -----*)

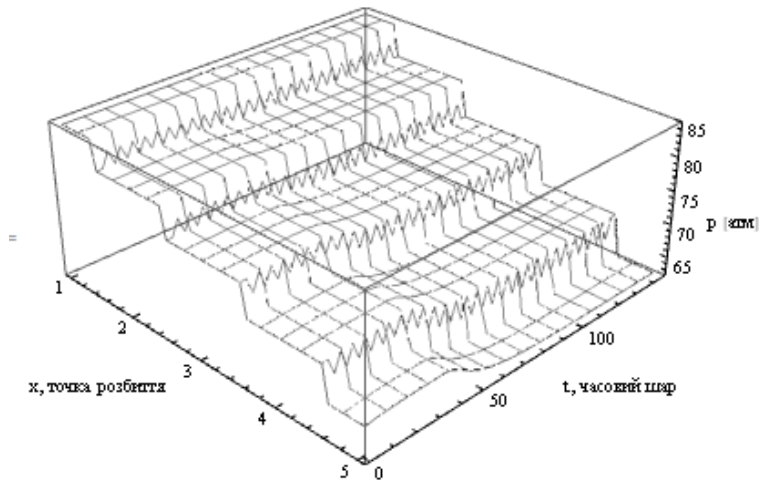
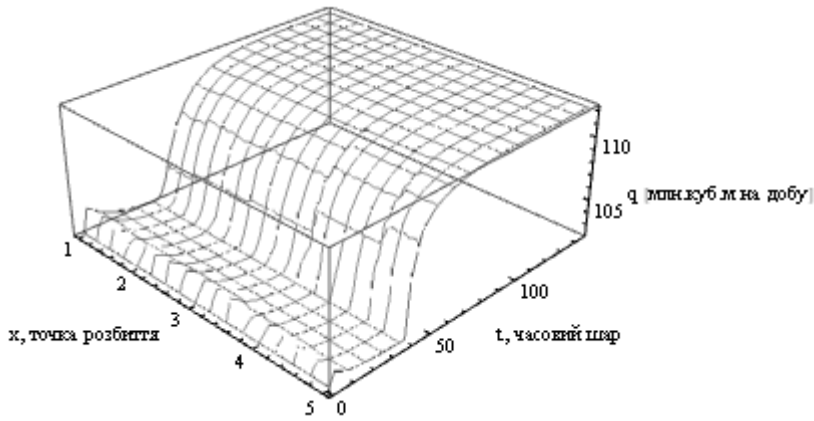
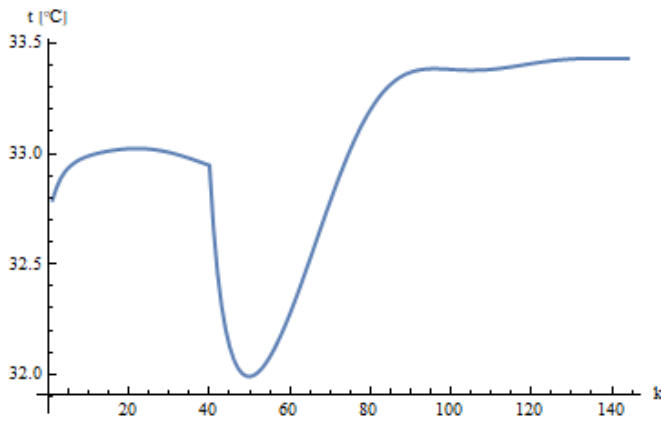
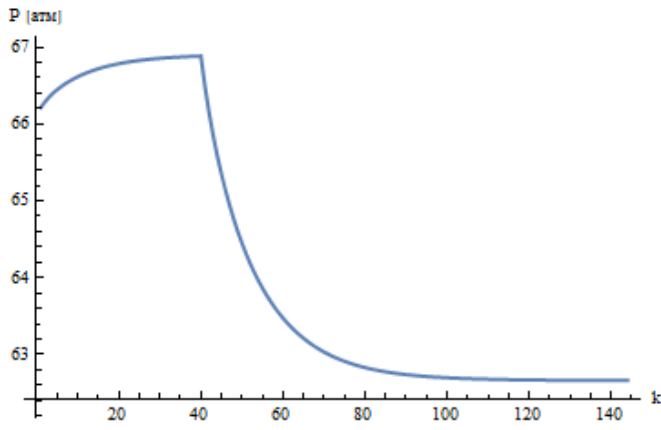
q (млн.куб.м в сутки)

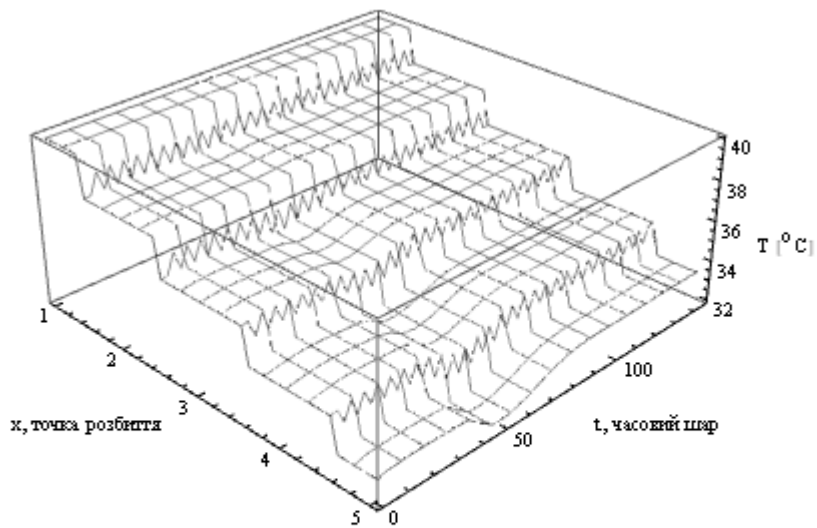




(*----- Результаты в
4 точке разбиения -----*)







Общее время, затраченное на все расчеты и вывод результатов:
12.2737935 сек = 0.204563 мин.

· `iterationCount`

· 312

ДОДАТОК Б

Код програми розрахунку ННРТГ по ДТ з використанням методу Ньютона

```

n = 5; (*число точек разбиения*)
(*рассматриваемая система уравнений:  $\frac{\partial \phi}{\partial t} + B \frac{\partial \phi}{\partial x} = \Phi$ *)
(*матрицы как функции от параметров (W,P,T),
вычисляемые в каждой точке разбиения*)

B[{W_, P_, T_}] :=  $\begin{pmatrix} 2 \alpha S T \frac{W}{P} & 1 - \alpha S T \frac{W^2}{P^2} & 0 \\ \alpha S T & 0 & 0 \\ \frac{(\gamma-1) \alpha S T^2}{P} & 0 & \frac{\gamma \alpha S W T}{P} \end{pmatrix};$ 

Phi[{W_, P_, T_}] :=
 $\begin{pmatrix} -\beta S T \frac{W \text{Abs}[W]}{P} - \frac{g}{\alpha S} \frac{P}{T} D[h[x], x] \\ 0 \\ -\frac{4K(\gamma-1)}{\text{Diam}} * \frac{T}{P} (T - Tgr) - g (\gamma - 1) \frac{PW}{T} D[h[x], x] \end{pmatrix};$ 

phi[{W_, P_, T_}] :=  $\begin{pmatrix} W \\ P \\ T \end{pmatrix};$ 

m = Dimensions[phi[{W, P, T}]][[1]]; (*размерность вектора phi*)

(*для теоретических выкладок сформируем вектора переменных,
соответствующих параметрам в каждой точке разбиения
рассматриваемого отрезка*)
WPTmas = {}; (*массив параметров W,
P и T во всех точках разбиения (в символьном виде)*)
For[i = 0, i <= n, i++,
{
AppendTo[WPTmas, {
ToExpression[StringJoin["W", ToString[i]]],
ToExpression[StringJoin["P", ToString[i]]],
ToExpression[StringJoin["T", ToString[i]]]};
}];
Print[
"Вектора параметров W,P и T во всех точках разбиения: ",
WPTmas];

deltaWPTmas = {}; (*массив искоемых поправок к неизвестным
(символьный вид)*)

```

```

For[i = 0, i ≤ n, i++,
{
  AppendTo[δWPTmas, {

    ToExpression[StringJoin["δW", ToString[i]]],

    ToExpression[StringJoin["δP", ToString[i]]],

    ToExpression[StringJoin["δT", ToString[i]]]};

  }];
Print["Вектора поправок к неизвестным:"];
δWPTmas
Вектора параметров W,P и T во всех точках разбиения:
{{W0, P0, T0}, {W1, P1, T1}, {W2, P2, T2},
 {W3, P3, T3}, {W4, P4, T4}, {W5, P5, T5}}
Вектора поправок к неизвестным:
{{δW0, δP0, δT0}, {δW1, δP1, δT1}, {δW2, δP2, δT2},
 {δW3, δP3, δT3}, {δW4, δP4, δT4}, {δW5, δP5, δT5}}
ψmas = {}; (*массив невязок (в символьном виде)*)
For[i = 0, i ≤ n, i++,
{
  Which[i = 0,
  {
    (* WPTmas[[i+1]] - вектор-
    строка параметров:  $(W_i^k, P_i^k, T_i^k)$  *)
    (* φ[WPTmas[[i]]] - вектор-
    столбец параметров:  $\begin{pmatrix} W_{i-1}^k \\ P_{i-1}^k \\ T_{i-1}^k \end{pmatrix}$  *)

    (* φ[WPTmas[[i+1]]] - вектор-столбец параметров:  $\begin{pmatrix} W_i^k \\ P_i^k \\ T_i^k \end{pmatrix}$  *)

    (* φ[WPTmas[[i+2]]] - вектор-
    столбец параметров:  $\begin{pmatrix} W_{i+1}^k \\ P_{i+1}^k \\ T_{i+1}^k \end{pmatrix}$  *)

    (* φ[{W0k1,P0k1,T0k1}] - вектор-
    столбец параметров с предыдущего временного
    слоя:  $\begin{pmatrix} W_i^{k-1} \\ P_i^{k-1} \\ T_i^{k-1} \end{pmatrix}$  *)

    (* B[WPTmas[[i+1]]] -
    матрица B с подставленными в нее параметрами
     $(W_i^k, P_i^k, T_i^k)$  *)
    (* B[WPTmas[[i+1]].φ[WPTmas[[i+1]]] -
    произведение матрицы B и вектора φ*)

```

```

(*  $\Phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
матрица B с подставленными в нее параметрами
 $(W_i^k, P_i^k, T_i^k)$  *)
AppendTo[ $\psi\text{mas}$ ,  $\frac{1}{\tau} \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
 $\frac{1}{\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
 $\frac{1}{\tau} \phi[\{W0k1, P0k1, T0k1\}]$  +
 $\frac{1}{\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i+2]]]$  -
 $\Phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$ ];
},
i < n,
{
AppendTo[ $\psi\text{mas}$ ,  $\frac{1}{\tau} \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
 $\frac{1}{\tau} \phi[\{W1k1, P1k1, T1k1\}]$  +
 $\frac{1}{2\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i+2]]]$  -
 $\frac{1}{2\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i]]]$  -
 $\Phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$ ];
},
i == n,
{
AppendTo[ $\psi\text{mas}$ ,  $\frac{1}{\tau} \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  +
 $\frac{1}{\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$  -
 $\frac{1}{\tau} \phi[\{Wnk1, Pnk1, Tnk1\}]$  -
 $\frac{1}{\Delta} B[\text{WPTmas}[[i+1]]] \cdot \phi[\text{WPTmas}[[i]]]$  -
 $\Phi[\text{WPTmas}[[i+1]]]$ ];
}
]
}];

```


Print["Вектор невязок:"];

For[i = 1, i ≤ n + 1, i++, Print[ψmas[[i]] // MatrixForm]]

Вектор невязок:

$$\left(\begin{array}{c} -\frac{2 S T_0 W_0^2 \alpha_{-P_0} \left(1 - \frac{S T_0 W_0^2 \alpha}{P_0^2}\right)}{\Delta} + \frac{2 S T_0 W_0 W_1 \alpha_{-P_1} \left(1 - \frac{S T_0 W_0^2 \alpha}{P_0^2}\right)}{\Delta} + \frac{W_0}{\alpha} - \frac{W_0 k_1}{\alpha} + \frac{S T_0 W_0 \beta \text{Abs}[W_0]}{P_0} + \frac{g P_0 h'[x]}{S T_0 \alpha} \\ - \frac{S T_0 W_0 \alpha}{\Delta} + \frac{S T_0 W_1 \alpha}{\Delta} + \frac{P_0}{\alpha} - \frac{P_0 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_0 (T_0 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_0} - \frac{S T_0^2 W_0 \alpha (-1 + \gamma)}{P_0} - \frac{S T_0^2 W_0 \alpha \gamma}{P_0} + \frac{S T_0^2 W_1 \alpha (-1 + \gamma)}{P_0} - \frac{S T_0 T_1 W_0 \alpha \gamma}{P_0} + \frac{T_0}{\alpha} - \frac{T_0 k_1}{\alpha} + \frac{g P_0 W_0 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_0} \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{c} -\frac{2 S T_1 W_1 W_2 \alpha_{-P_1} \left(1 - \frac{S T_1 W_1^2 \alpha}{P_1^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{2 S T_1 W_1 W_2 \alpha_{-P_2} \left(1 - \frac{S T_1 W_1^2 \alpha}{P_1^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{W_1}{\alpha} - \frac{W_1 k_1}{\alpha} + \frac{S T_1 W_1 \beta \text{Abs}[W_1]}{P_1} + \frac{g P_1 h'[x]}{S T_1 \alpha} \\ - \frac{S T_1 W_0 \alpha}{2 \Delta} + \frac{S T_1 W_2 \alpha}{2 \Delta} + \frac{P_1}{\alpha} - \frac{P_1 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_1 (T_1 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_1} - \frac{S T_1^2 W_0 \alpha (-1 + \gamma)}{P_1} - \frac{S T_0 T_1 W_1 \alpha \gamma}{2 \Delta} + \frac{S T_1^2 W_2 \alpha (-1 + \gamma)}{P_1} - \frac{S T_1 T_2 W_1 \alpha \gamma}{P_1} + \frac{T_1}{\alpha} - \frac{T_1 k_1}{\alpha} + \frac{g P_1 W_1 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_1} \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{c} -\frac{2 S T_2 W_2 W_3 \alpha_{-P_2} \left(1 - \frac{S T_2 W_2^2 \alpha}{P_2^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{2 S T_2 W_2 W_3 \alpha_{-P_3} \left(1 - \frac{S T_2 W_2^2 \alpha}{P_2^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{W_2}{\alpha} - \frac{W_2 k_1}{\alpha} + \frac{S T_2 W_2 \beta \text{Abs}[W_2]}{P_2} + \frac{g P_2 h'[x]}{S T_2 \alpha} \\ - \frac{S T_2 W_1 \alpha}{2 \Delta} + \frac{S T_2 W_3 \alpha}{2 \Delta} + \frac{P_2}{\alpha} - \frac{P_2 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_2 (T_2 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_2} - \frac{S T_2^2 W_1 \alpha (-1 + \gamma)}{P_2} - \frac{S T_1 T_2 W_2 \alpha \gamma}{P_2} + \frac{S T_2^2 W_3 \alpha (-1 + \gamma)}{P_2} - \frac{S T_2 T_3 W_2 \alpha \gamma}{P_2} + \frac{T_2}{\alpha} - \frac{T_2 k_1}{\alpha} + \frac{g P_2 W_2 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_2} \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{c} -\frac{2 S T_3 W_3 W_4 \alpha_{-P_3} \left(1 - \frac{S T_3 W_3^2 \alpha}{P_3^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{2 S T_3 W_3 W_4 \alpha_{-P_4} \left(1 - \frac{S T_3 W_3^2 \alpha}{P_3^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{W_3}{\alpha} - \frac{W_3 k_1}{\alpha} + \frac{S T_3 W_3 \beta \text{Abs}[W_3]}{P_3} + \frac{g P_3 h'[x]}{S T_3 \alpha} \\ - \frac{S T_3 W_2 \alpha}{2 \Delta} + \frac{S T_3 W_4 \alpha}{2 \Delta} + \frac{P_3}{\alpha} - \frac{P_3 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_3 (T_3 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_3} - \frac{S T_3^2 W_2 \alpha (-1 + \gamma)}{P_3} - \frac{S T_2 T_3 W_3 \alpha \gamma}{P_3} + \frac{S T_3^2 W_4 \alpha (-1 + \gamma)}{P_3} - \frac{S T_3 T_4 W_3 \alpha \gamma}{P_3} + \frac{T_3}{\alpha} - \frac{T_3 k_1}{\alpha} + \frac{g P_3 W_3 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_3} \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{c} -\frac{2 S T_4 W_4 W_5 \alpha_{-P_4} \left(1 - \frac{S T_4 W_4^2 \alpha}{P_4^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{2 S T_4 W_4 W_5 \alpha_{-P_5} \left(1 - \frac{S T_4 W_4^2 \alpha}{P_4^2}\right)}{2 \Delta} + \frac{W_4}{\alpha} - \frac{W_4 k_1}{\alpha} + \frac{S T_4 W_4 \beta \text{Abs}[W_4]}{P_4} + \frac{g P_4 h'[x]}{S T_4 \alpha} \\ - \frac{S T_4 W_3 \alpha}{2 \Delta} + \frac{S T_4 W_5 \alpha}{2 \Delta} + \frac{P_4}{\alpha} - \frac{P_4 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_4 (T_4 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_4} - \frac{S T_4^2 W_3 \alpha (-1 + \gamma)}{P_4} - \frac{S T_3 T_4 W_4 \alpha \gamma}{P_4} + \frac{S T_4^2 W_5 \alpha (-1 + \gamma)}{P_4} - \frac{S T_4 T_5 W_4 \alpha \gamma}{P_4} + \frac{T_4}{\alpha} - \frac{T_4 k_1}{\alpha} + \frac{g P_4 W_4 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_4} \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{c} -\frac{2 S T_5 W_5 W_6 \alpha_{-P_5} \left(1 - \frac{S T_5 W_5^2 \alpha}{P_5^2}\right)}{\Delta} + \frac{2 S T_5 W_5^2 \alpha_{-P_5} \left(1 - \frac{S T_5 W_5^2 \alpha}{P_5^2}\right)}{\Delta} + \frac{W_5}{\alpha} - \frac{W_5 k_1}{\alpha} + \frac{S T_5 W_5 \beta \text{Abs}[W_5]}{P_5} + \frac{g P_5 h'[x]}{S T_5 \alpha} \\ - \frac{S T_5 W_4 \alpha}{\Delta} + \frac{S T_5 W_6 \alpha}{\Delta} + \frac{P_5}{\alpha} - \frac{P_5 k_1}{\alpha} \\ \frac{4 K T_5 (T_5 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_5} - \frac{S T_5^2 W_4 \alpha (-1 + \gamma)}{P_5} - \frac{S T_4 T_5 W_5 \alpha \gamma}{P_5} + \frac{S T_5^2 W_6 \alpha (-1 + \gamma)}{P_5} - \frac{S T_5^2 W_5 \alpha \gamma}{P_5} + \frac{T_5}{\alpha} - \frac{T_5 k_1}{\alpha} + \frac{g P_5 W_5 (-1 + \gamma) h'[x]}{T_5} \end{array} \right)$$

```

(*создаем матрицу (n+1)x(n+1) (если n=5 => размер 6x6)*)
mass = Array[mas, {n + 1, n + 1}, {0, 0}]; (*массив производных невязок*)
For[i = 0, i ≤ n, i++,
  For[j = 0, j ≤ n, j++,
    {
      (*каждый элемент созданной матрицы производных mass расширим
      матрицей mxm (3x3 - по числу параметров (W,P,T)), и заполним все матрицы нулями*)
      mas[i, j] = ConstantArray[0, {m, m}]; (*обнулим все*)
    }
  ]
]
Abs'[W_] := Abs[W] / W

```

```

For[i = 0, i ≤ n, i++,
  For[j = 0, j ≤ n, j++,
    {
      (* WPTmas[[i+1]] - вектор-строка параметров: (Wik, Pik, Tik)*
      (* ψmas[[i+1]] - невязка ψik в точке (Wik, Pik, Tik)*
      (* D[ψmas[[i+1]], WPTmas[[j+1, 1]]] - производная невязки ψik по параметру Wjk - возвращает вектор-
      столбец mx1 (3x1)  $\left( \frac{\partial \psi_{i,1}^k}{\partial W_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,2}^k}{\partial W_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,3}^k}{\partial W_j^k} \right)^T$  *)
      (* D[ψmas[[i+1]], WPTmas[[j+1, 2]]] - производная невязки ψik по параметру Pjk - возвращает вектор-
      столбец mx1 (3x1)  $\left( \frac{\partial \psi_{i,1}^k}{\partial P_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,2}^k}{\partial P_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,3}^k}{\partial P_j^k} \right)^T$  *)
      (* D[ψmas[[i+1]], WPTmas[[j+1, 3]]] - производная невязки ψik по параметру Tjk - возвращает вектор-
      столбец mx1 (3x1)  $\left( \frac{\partial \psi_{i,1}^k}{\partial T_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,2}^k}{\partial T_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,3}^k}{\partial T_j^k} \right)^T$  *)
      (* ArrayFlatten[{{m11, m12, m13}, {m21, m22, m23}}] - mij -
      матрицы. Функция составляет из переданных ей матриц новую следующим образом:
      
$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \end{pmatrix}$$
 *)
      (* Составляем матрицу производных невязки в точке как  $\left( \frac{\partial \psi_{i,1}^k}{\partial W_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,2}^k}{\partial P_j^k}, \frac{\partial \psi_{i,3}^k}{\partial T_j^k} \right)$  *)
      mas[i, j] = ArrayFlatten[{{D[ψmas[[i + 1]], WPTmas[[j + 1, 1]]],
        D[ψmas[[i + 1]], WPTmas[[j + 1, 2]]],
        D[ψmas[[i + 1]], WPTmas[[j + 1, 3]]]}}];
    }
  ]
];

```

```

startWorkTime = SessionTime[];

```

```

(*индекс временных слоев*)
k = 0;
(*----- k=0 -----*)
(*-----*)
(*----- Стационарный режим -----*)
(*-----*)
(*СТАЦИОНАРНЫЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ТРАНСПОРТА ГАЗА ПО ЛИНЕЙНОМУ УЧАСТКУ ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ*)
(*Считается, что участок [0,L] разбит на n частей. Найти давление  $P_{rI}$  и температуру  $t_i$  в каждой
точке участка с координатой  $l_i$ , находящейся от начала участка на расстоянии  $l_i = \frac{l}{n} i$ ,
 $i = \overline{1, n}$  и построить графики давления  $P_{rI}$  и температуры  $t_i$  от  $l_i$ ,  $i = \overline{0, n}$ , где  $l_0 = 0$ ,  $P_{r0} = P_H$ ,  $t_0 = t_H$ ,  $n = 5$ .)
(*Алгоритм расчета стационарного режима транспорта газа*)
(*Расчет параметров газового потока  $P_l$ ,  $t_l$  при стационарном режиме транспорта газа в
точке участка с координатой  $l$ , находящейся на расстоянии  $l$  от начала участка, производится следующим образом. *)
(* 1. Вводим значения используемых величин и начальные данные *)
(*длина участка [км]*)
L = 112;

$$\Delta = \frac{L}{n};$$

(*внутренний диаметр участка газопровода [мм]*)
Diam = 1400;
(*толщина стенок трубы [мм]*)
 $\delta = 10;$ 
(*начало отрезка*)
 $l_0 = 0;$ 
(*давление и температура газа в начале участка [атм.], [°C]*)
 $P_H = 84.6364456;$ 
 $t_H = 40;$ 
(*коэффициент сжимаемости газа*)
 $z_H = 0.9;$ 
(*коммерческий расход [млн. куб. м в сутки]*)
 $q = 102.266;$ 
(*температура грунта [°C]*)
 $t_{gr} = 10;$ 
(*коэффициент теплопередачи от трубы к грунту [ккал/м. куб. ч. К]*)
 $K = 1.4;$ 
(*коэффициент эффективности участка*)
 $E_f = 0.95;$ 
(*поправочный коэффициент, учитывающий отклонение режима течения газа от квадратичного*)
 $\alpha_{coef} = 1;$ 
(*коэффициент, учитывающий влияние подкладных колец*)
 $\phi_{coef} = 1;$ 
(*удельная теплоемкость газа [ккал/кг*К]*)
 $C_p = 0.655952;$ 
(*относительная плотность газа по воздуху*)
 $\Delta var = 0.604707;$ 
(*точность расчета*)
 $\epsilon = 10^{-6};$ 
(*2. Находим наружный диаметр участка газопровода [мм]*)
 $DH = Diam + 2 \delta;$ 

```

```

(*3. Значения давления и температуры в 1-ой точке участка вычисляются по следующему алгоритму:*)
(*3.1*)

$$\theta = \frac{62.6 * K * DH}{Cp * \Delta var * q * 10^6};$$

(*3.2 Переводим в систему единиц СИ:*)
(*(температура из градусов Цельсия в Кельвины)*)
Tgr = trp + 273.15;
TH = tH + 273.15;
(*массовый расход [кг/сек]*)
GSi = q * 13.94676 * \Delta var;
(*площадь сечения [м2]*)

$$S = \frac{\pi \left(\frac{Diam}{1000}\right)^2}{4};$$

(*удельный массовый расход*)

$$WSi = \frac{GSi}{S};$$

(*массивы для вывода результатов (стационарный режим, система СИ, усеченная таблица в системе СИ)*)
masEndRez = {};
masEndRezSi = {};
masEndRezNS = {};
stat = {}; (*массив для передачи в нестационарный режим*)
For [i = 1, i ≤ n, i++,
{
  (*расстояние от начала участка до точки этого участка с координатой l[км]*)
  li = N[\Delta * i];
  zcp = zH;
  rez = {}; (*массив для вывода промежуточных результатов*)
  AppendTo[rez, {"T1 [K]", "t1 [°C]", "Tcp [K]", "C", "P1 [атм.]", "Pcp[атм.]", "zcp", "P1Prev",
    "C", "P1 [атм.]", "Abs[P1Prev-P1]"}];
  (*3.3 Температура газа в данной точке участка газопровода находится по формуле:*)
  (*температура газа T1 в точке участка с координатой l,
  находящейся на расстоянии l от начала участка газопровода[K]*)
  (*температура газа t1 в точке участка с координатой l,
  находящейся на расстоянии l от начала участка [°C]*)
  T1 = Tgr + (TH - Tgr) E-θ li;
  t1 = T1 - 273.15;
  (*3.4 Далее определяем среднюю температуру газа на участке[0,1]:*)
  (*средняя температура транспортируемого газа по длине участка[K]*)
  
$$Tcp = Tgr + (TH - Tgr) * \frac{1 - e^{-\theta li}}{\theta li};$$

  (*3.5*)
  
$$c = \frac{\Delta var * li * Tcp * zcp}{\alpha coef^2 * \phi coef^2 * (1.64 * 10^{-6})^2 * Diam^{5.2} * Ef^2};$$

}

```

```

(*3.6 Значение давления находится из формулы*)
(*давление P1 в точке участка с координатой l, находящейся на расстоянии l от начала участка [атм.]*)
P1 =  $\sqrt{PH^2 - c * Abs[q] * q}$ ;
P1Prev = P1 + 100; (*для входа в цикл*)
kf = 0; (*для заполнения первой строки таблицы*)
While[Abs[P1Prev - P1] ≥ ε,
  (*3.7 Находим среднее значение давления газа на участке[0,l]:*)
  Pcp =  $\frac{2}{3} \left( PH + \frac{P1^2}{PH + P1} \right)$ ;
  (*3.8 Средний коэффициент сжимаемости газа по длине участка[0,l]:*)
  zcp = 1 - ((Pcp - 6) (0.345 * 10-2 * Δvar - 0.446 * 10-3) + 0.015) (1.3 - 0.0144 (Tcp - 282.8));

  (*3.9*)
  P1Prev = P1;
(*3.10*)
  c =  $\frac{\Delta var * li * Tcp * zcp}{acoef^2 * \phi coef^2 * (1.64 * 10^{-6})^2 * Diam^{5.2} * Ef^2}$ ;
(*3.11*)
  P1 =  $\sqrt{PH^2 - c * Abs[q] * q}$ ;
  If[kf == 0, AppendTo[rez, {NumberForm[Tl, {6, 3}], NumberForm[tl, {6, 4}], NumberForm[Tcp, {6, 3}],
    NumberForm[c, {7, 6}], NumberForm[P1, {6, 4}], NumberForm[Pcp, {6, 4}], NumberForm[zcp, {7, 6}],
    NumberForm[P1Prev, {6, 4}], NumberForm[c, {7, 6}], NumberForm[P1, {6, 4}], Abs[P1Prev - P1]}],
    AppendTo[rez, {"", "", "", "", "", NumberForm[Pcp, {6, 4}], NumberForm[zcp, {7, 6}],
      NumberForm[P1Prev, {6, 4}], NumberForm[c, {7, 6}], NumberForm[P1, {6, 4}], Abs[P1Prev - P1]}]];
  kf++;
  (*3.12 Если Abs[P1Prev-P1]<ε,то P1 найдено,в противном случае переходим к пункту 3.7*)
  (*3.13 Вывод tl, P1, Tcp, zcp*)
]; (*While*)
(*печатать результатов итерационного процесса*)
(*Print["Результаты в точке №",i," на расстоянии " ,li," км от начала участка:"];*)

AppendTo[masEndRez, {li, GSi, P1, tl}];
AppendTo[masEndRezSi, {1000 * li, GSi, WSi, NumberForm[98066.5 * (P1), 9], Tl}];
AppendTo[masEndRezNS, {1000 * li, WSi, NumberForm[98066.5 * (P1), 9], Tl}];
AppendTo[stat, {WSi, 98066.5 * (P1), Tl}];

(*Print[Grid[rez,Frame→ All,Background→ {None,{1→ LightGray}},Spacings→ {1,1}]];*)
}]; (*For*)

```

```

Print[Style["Стационарный режим:", 18, FontWeight → Bold]];
Grid[masEndRez, Frame -> All, Dividers -> {True, 2 -> False}, Background -> {None, {LightGray, LightGray}},
  Spacings -> {1, 1}
Print[Style["Перевод в систему СИ:", 18, FontWeight → Bold]];
Grid[masEndRezSi, Frame -> All, Dividers -> {True, 2 -> False}, Background -> {None, {LightGray, LightGray}},
  Spacings -> {1, 1}
Print[Style["Входные данные для моделирования нестационарного режима:", 18, FontWeight → Bold]];
Grid[masEndRezNS, Frame -> All, Dividers -> {True, 2 -> False}, Background -> {None, {LightGray, LightGray}},
  Spacings -> {1, 1}

tempoMasStat = stat;
Do[{{tempoMasStat[[i, 1]] = tempoMasStat[[i, 1]] +  $\frac{S}{13.94676 * \Delta var}$ ,
  tempoMasStat[[i, 2]] = tempoMasStat[[i, 2]] / 98066.5,
  tempoMasStat[[i, 3]] = tempoMasStat[[i, 3]] - 273.15}}, {i, 1, n + 1}];
qPlotMas = {};
PplotMas = {};
TplotMas = {};
Do[{AppendTo[qPlotMas, tempoMasStat[[i, 1]]], AppendTo[PplotMas, tempoMasStat[[i, 2]]],
  AppendTo[TplotMas, tempoMasStat[[i, 3]]]}, {i, 1, n + 1}];
Print[
  ListLinePlot[qPlotMas, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"x", "q [млн.куб.м в сутки]"}];
Print[
  ListLinePlot[PplotMas, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"x", "P [атм]"}];
Print[
  ListLinePlot[TplotMas, PlotRange -> {30, 40}(*PlotRange->All*), AxesLabel -> {"x", "t [°C]"}];

(*clear all unnecessary lists*)
Clear[masEndRez, masEndRezSi, masEndRezNS, rez, qPlotMas, PplotMas, TplotMas];
(*-----*)
(*-----*)
(*-----*)

(*длина участка [м]*)
L = L * 1000; (*длина участка*)
l0 = 0; (*начало отрезка*)
 $\Delta = \frac{L - l_0}{n}$ ; (*step= $\frac{L}{n}$  - шаг по иксу*)
(*внутренний диаметр участка газопровода [м]*)
Diam = 1400 / 1000;
(*площадь поперечного сечения трубы [м2])
S =  $\frac{\text{Pi (Diam)}^2}{4}$ ;
(*удельная теплоемкость газа[ккал/кг*К]*)
Cp = 0.655952 * 4186.8;
(*Ускорение свободного падения*)
g = 9.80665;
(*относительная плотность газа по воздуху*)
 $\Delta var = 0.604707$ ;
(*универсальная газовая постоянная*)
R =  $\frac{287}{\Delta var * g}$ ;
(*коэффициент эффективности участка*)
Ef = 0.95;

```

```

λ =  $\frac{0.03817}{(\text{Diam} * 1000)^{0.2} * E f^2}$ ;
h[x_] := 1.; (*глубина залегания трубы*)
(*коэффициент сжимаемости газа*)
z = zcp;
α =  $\frac{z g R}{S}$ ;
β =  $\frac{\lambda \alpha}{2 \text{Diam}}$ ;
γ =  $1. / \left(1. - \frac{z g R}{Cp}\right)$ ;
Tgr = 10. + 273.15; (*температура грунта[K]*)
K = 1.4 * 1.163; (*коэффициент теплопередачи от трубы к грунту[ккал/м.куб.ч.К]*)
τ = 5 * 60; (*шаг по времени - 5 мин*)
time = 12. * 60. * 60.; (*общее время моделирования - 12 часов*)
timeLayersNumber =  $\frac{\text{time}}{\tau}$ ;
ε = 10-6; (*точность расчета*)

(* берем стационарное распределение и корректируем согласно граничным условиям *)
(*граничные условия*)
(*лучше задавать на одной границе давление и температуру, на другой - массовый расход*)
Pfirst = 84.6364456; (*[ати.]*)
PSiFirst = 98066.5 * (Pfirst); (*ати → Па*)
Tfirst = 40.; (*[°C]*)
TSiFirst = Tfirst + 273.15; (*(температура из градусов Цельсия в Кельвины)*)
Glast = 112.266; (*[млн.куб.м в сутки]*)
WSiLast =  $\frac{\text{Glast} * 13.94676 * \Delta var}{S}$ ; (*удельный массовый расход*)

result = Array[res, {n + 1, m}]; (*Матрица поправок к неизвестным (n+1)хm (6х3)*)
grafSiList = {};
(* общее число итераций *)
iterationCount = 0;
AppendTo[grafSiList, Table[ $\left\{\left\{\text{stat}[[i, 1]] * \frac{S}{13.94676 * \Delta var}, \right.\right.$ 
    stat[[i, 2]] / 98066.5,
    stat[[i, 3]] - 273.15}, {i, 1, n + 1}]];
fixStat = stat;
k = 1;

```

```

While[k ≤ timeLayersNumber,
{
  prevLayerResult = fixStat;

  s = 0; (*Индекс итераций внутри временного слоя*)
  ψi = {ε * 10 000};
  While[Max[Abs[ψi]] > ε,
  {
    zψCoef = {};
    If[s = 0,
    {
      (* заменяем нужные значения соответствующими установленными
      граничными *)
      fixStat[[1, 2]] = PSiFirst;
      fixStat[[1, 3]] = TSiFirst;

      If[k < 40,
      {
        fixStat[[n + 1, 1]] =  $\frac{102.266 * 13.94676 * \Delta var}{S}$ ;
      },
      {
        fixStat[[n + 1, 1]] =  $\frac{112.266 * 13.94676 * \Delta var}{S}$ ;
        (*92.266*)
      }
    ]
  ]
  },
  {
    (*производные*)
    dFdx = Array[dF, {n + 1, n + 1}, {0, 0}];
    For[i = 0, i ≤ n, i++,
    For[j = 0, j ≤ n, j++,
    {
      dF[i, j] = ConstantArray[0, {m, m}];
    }
  ]
  ];
  For[i = 0, i ≤ n, i++,
  For[j = 0, j ≤ n, j++,
  {
    Which[i = 0,
    {

```



```

dF[i, j] = mas[i, j] /. {
  (*точки с текущего временного слоя с предыдущей итерации*)
  (*нулевая точка*)
  WPTmas[[1, 1]] → fixStat[[1, 1]], (*W0k, s-1*)
  WPTmas[[1, 2]] → fixStat[[1, 2]], (*P0k, s-1*)
  WPTmas[[1, 3]] → fixStat[[1, 3]], (*T0k, s-1*)
  (*первая точка*)
  WPTmas[[2, 1]] → fixStat[[2, 1]], (*W1k, s-1*)
  WPTmas[[2, 2]] → fixStat[[2, 2]], (*P1k, s-1*)
  WPTmas[[2, 3]] → fixStat[[2, 3]] (*T1k, s-1*)
};
},
i = n,
{
  dF[i, j] = mas[i, j] /. {
    (*точки с текущего временного слоя с предыдущей итерации*)
    (*предпоследняя точка*)
    WPTmas[[n, 1]] → fixStat[[n, 1]], (*Wn-1k, s-1*)
    WPTmas[[n, 2]] → fixStat[[n, 2]], (*Pn-1k, s-1*)
    WPTmas[[n, 3]] → fixStat[[n, 3]], (*Tn-1k, s-1*)
    (*последняя точка*)
    WPTmas[[n + 1, 1]] → fixStat[[n + 1, 1]], (*Wnk, s-1*)
    WPTmas[[n + 1, 2]] → fixStat[[n + 1, 2]], (*Pnk, s-1*)
    WPTmas[[n + 1, 3]] → fixStat[[n + 1, 3]] (*Tnk, s-1*)
  };
},
0 < i < n,
{
  dF[i, j] = mas[i, j] /. {
    (*точки с текущего временного слоя с предыдущей итерации*)
    (*i-1 точка*)
    WPTmas[[i, 1]] → fixStat[[i, 1]], (*Wi-1k, s-1*)
    WPTmas[[i, 2]] → fixStat[[i, 2]], (*Pi-1k, s-1*)
    WPTmas[[i, 3]] → fixStat[[i, 3]], (*Ti-1k, s-1*)
    (*i точка*)
    WPTmas[[i + 1, 1]] → fixStat[[i + 1, 1]], (*Wik, s-1*)
    WPTmas[[i + 1, 2]] → fixStat[[i + 1, 2]], (*Pik, s-1*)
    WPTmas[[i + 1, 3]] → fixStat[[i + 1, 3]], (*Tik, s-1*)
    (*i+1 точка*)
    WPTmas[[i + 2, 1]] → fixStat[[i + 2, 1]], (*Wi+1k, s-1*)
    WPTmas[[i + 2, 2]] → fixStat[[i + 2, 2]], (*Pi+1k, s-1*)
    WPTmas[[i + 2, 3]] → fixStat[[i + 2, 3]] (*Ti+1k, s-1*)
  };
}
}

```

```

]] (*Which*)
]] (*For[j]*)
]; (*For[i]*)
(*Print["Матрица производных"];
Print[dFdx//MatrixForm];*)
(*корректируем полученные матрицы, чтобы получить уравнения
 $\delta P_0^{k,s} = 0,$ 
 $\delta T_0^{k,s} = 0,$ 
 $\delta W_n^{k,s} = 0$ 
*)
(*Print["Корректируем полученные матрицы с учетом граничных условий"];*)
M =  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$ 
M[[1]] = dF[0, 0][[1]];
dFdx[[1, 1]] = M;
M =  $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$ 
M[[2]] = dF[n, n][[2]];
M[[3]] = dF[n, n][[3]];
dFdx[[n + 1, n + 1]] = M;

For[i = 1, i ≤ n, i++, {
  M =  $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$ 
  M[[1]] = dF[0, i][[1]];
  dFdx[[1, i + 1]] = M;
}] ×
For[i = 0, i ≤ n - 1, i++, {
  M =  $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$ 
  M[[2]] = dF[n, i][[2]];
  M[[3]] = dF[n, i][[3]];
  dFdx[[n + 1, i + 1]] = M;
}];

(*Print["Уравнения для нахождения новых значений параметров:"];*)
equations = {};
For[i = 1, i ≤ n + 1, ++i, {
  For[j = 1, j ≤ 3, j++, {
    AppendTo[equations, Thread[Sum[dFdx[[i, 1]].δWPTmas[[1]], {1, 1, n + 1}][[j]] ==
      ψi[[i]][[j]]]];
  }];
}];

```

```

(*for Solve - формируем систему уравнений в нужном виде*)
equa = equations[[1, 1]];
Do[equa = And[equa, equations[[i, 1]], {i, 2, Length[equations]}];
list = {};
For[i = 1, i <= Length[WPTmas], i++,
  For[j = 1, j <= 3, j++, {
    AppendTo[list,  $\delta$ WPTmas[[i, j]]];
  }]];
solution = Solve[equa, list];
index = 1;

For[i = 1, i <= n + 1, i++,
  For[j = 1, j <= m, j++,
    {
      result[[i, j]] = solution[[1, index, 2]];
      index++;
    }]];

(*Рассчитываем новые значения параметров*)
For[i = 1, i <= n + 1, i++,
  For[j = 1, j <= m, j++,
    {
      fixStat[[i, j]] -= result[[i, j]];
      index++;
    }]];
(Print["Полученные значения параметров на данной итерации"];
Print[fixStat//MatrixForm];*)
}(*else (if(s $\neq$ 0))*)
]; (*if (s=0)*)

(*берем данные с предыдущей итерации текущего временного слоя и с предыдущего
временного слоя*)
(*невязухи*)
 $\psi$ i = {};

For[i = 0, i <= n, i++,
  {
    Which[i = 0,
      {
        AppendTo[ $\psi$ i,  $\psi$ mas[[i + 1]] /. {
          (*точки с текущего временного слоя с предыдущей итерации*)
          (*нулевая точка*)
          WPTmas[[1, 1]]  $\rightarrow$  fixStat[[1, 1]], (* $W_0^{k,s-1}$ *)
          WPTmas[[1, 2]]  $\rightarrow$  fixStat[[1, 2]], (* $P_0^{k,s-1}$ *)
          WPTmas[[1, 3]]  $\rightarrow$  fixStat[[1, 3]], (* $T_0^{k,s-1}$ *)
          (*первая точка*)
          WPTmas[[2, 1]]  $\rightarrow$  fixStat[[2, 1]], (* $W_1^{k,s-1}$ *)
          WPTmas[[2, 2]]  $\rightarrow$  fixStat[[2, 2]], (* $P_1^{k,s-1}$ *)
          WPTmas[[2, 3]]  $\rightarrow$  fixStat[[2, 3]], (* $T_1^{k,s-1}$ *)

```

```

(*нулевая точка с предыдущего временного слоя*)
φ[{W0k1, P0k1, T0k1}][[1, 1]] → prevLayerResult[[1, 1]], (*W0k-1, s-1 *)
φ[{W0k1, P0k1, T0k1}][[2, 1]] → prevLayerResult[[1, 2]], (*P0k-1, s-1 *)
φ[{W0k1, P0k1, T0k1}][[3, 1]] → prevLayerResult[[1, 3]] (*T0k-1, s-1 *)
]];
},
0 < i < n,
{
AppendTo[ψi, ψmas[[i + 1]] /. {
(*точки с текущего временного слоя с предыдущей итерации*)
(* (i-1) точка*)
WPTmas[[i, 1]] → fixStat[[i, 1]], (*Wi-1k, s-1 *)
WPTmas[[i, 2]] → fixStat[[i, 2]], (*Pi-1k, s-1 *)
WPTmas[[i, 3]] → fixStat[[i, 3]], (*Ti-1k, s-1 *)
(* i точка*)
WPTmas[[i + 1, 1]] → fixStat[[i + 1, 1]], (*Wik, s-1 *)
WPTmas[[i + 1, 2]] → fixStat[[i + 1, 2]], (*Pik, s-1 *)
WPTmas[[i + 1, 3]] → fixStat[[i + 1, 3]], (*Tik, s-1 *)
(* (i+1) точка*)
WPTmas[[i + 2, 1]] → fixStat[[i + 2, 1]], (*Wi+1k, s-1 *)
WPTmas[[i + 2, 2]] → fixStat[[i + 2, 2]], (*Pi+1k, s-1 *)
WPTmas[[i + 2, 3]] → fixStat[[i + 2, 3]], (*Ti+1k, s-1 *)
(* i-я точка с предыдущего временного слоя*)
φ[{Wik1, Pik1, Tik1}][[1, 1]] → prevLayerResult[[i + 1, 1]], (*Wik-1, s-1 *)
φ[{Wik1, Pik1, Tik1}][[2, 1]] → prevLayerResult[[i + 1, 2]], (*Pik-1, s-1 *)
φ[{Wik1, Pik1, Tik1}][[3, 1]] → prevLayerResult[[i + 1, 3]] (*Tik-1, s-1 *)
}];
},
i = n,
{
AppendTo[ψi, ψmas[[i + 1]] /. {
(*точки с текущего временного слоя с предыдущей итерации*)
(*предпоследняя точка*)
WPTmas[[n, 1]] → fixStat[[n, 1]], (*Wn-1k, s-1 *)
WPTmas[[n, 2]] → fixStat[[n, 2]], (*Pn-1k, s-1 *)
WPTmas[[n, 3]] → fixStat[[n, 3]], (*Tn-1k, s-1 *)
(*последняя точка*)
WPTmas[[n + 1, 1]] → fixStat[[n + 1, 1]], (*Wnk, s-1 *)
WPTmas[[n + 1, 2]] → fixStat[[n + 1, 2]], (*Pnk, s-1 *)
WPTmas[[n + 1, 3]] → fixStat[[n + 1, 3]], (*Tnk, s-1 *)
(*последняя точка с предыдущего временного слоя*)
φ[{Wnk1, Pnk1, Tnk1}][[1, 1]] → prevLayerResult[[n + 1, 1]], (*Wnk-1, s-1 *)
φ[{Wnk1, Pnk1, Tnk1}][[2, 1]] → prevLayerResult[[n + 1, 2]], (*Pnk-1, s-1 *)
φ[{Wnk1, Pnk1, Tnk1}][[3, 1]] → prevLayerResult[[n + 1, 3]] (*Tnk-1, s-1 *)
}];
}
];

```

```

    }];

    (*Print["Вектор невязок:"];*)
    psi[[1, 2]] = {0};
    psi[[1, 3]] = {0};
    psi[[n + 1, 1]] = {0};

    s++;
  }];

  --
  iterationCount += s - 1;
  Print["На данном временном слое (k = ", k, ") получим:"];
  Print["Количество итераций s=: ", s - 1];
  tempoMas = fixStat;
  Do[{tempoMas[[i, 1]] = tempoMas[[i, 1]] *  $\frac{S}{13.94676 * \Delta var}$ ,
      tempoMas[[i, 2]] = tempoMas[[i, 2]] / 98066.5,
      tempoMas[[i, 3]] = tempoMas[[i, 3]] - 273.15}, {i, 1, n + 1}];
  Print["В системе единиц стационарного режима"];
  Print[NumberForm[tempoMas // MatrixForm, 9]];
  AppendTo[grafSiList, tempoMas];
  Print[fixStat // MatrixForm];
  k++;
}]; While[k]
totalWorkTime = SessionTime[] - startWorkTime;

Print["Время, затраченное на все расчеты и вывод результатов: без графиков ",
      totalWorkTime, " сек = ", N[totalWorkTime / 60], " мин."];

Print["(*----- Графики -----*)"];
For[j = 1, j <= n + 1, j++,
  {
    qPlotMas = {};
    pPlotMas = {};
    tPlotMas = {};
    Do[{AppendTo[qPlotMas, grafSiList[[i, j, 1]]],
        AppendTo[pPlotMas, grafSiList[[i, j, 2]]], AppendTo[tPlotMas, grafSiList[[i, j, 3]]]},
      {i, 1, timeLayersNumber}];
    Print["(*----- Результаты в ", j - 1,
          " точке разбиения -----*)"];
    Print[
      ListLinePlot[qPlotMas, PlotRange -> {All, All},
        AxesLabel -> {"k", "q [млн.куб.м в сутки]"}, PlotStyle -> Thick];
    Print[
      ListLinePlot[pPlotMas, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"k", "P [атм]"},
        PlotStyle -> Thick];
    Print[
      ListLinePlot[tPlotMas, PlotRange -> All, AxesLabel -> {"k", "t [°C]"},
        PlotStyle -> Thick];
  }];

```

```

Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 1]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
  AxesLabel -> {"x, точка разбиття", "t, часовий шар", "q [млн.куб.м на добу]"},
  PlotStyle -> {Transparent}]
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 2]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
  AxesLabel -> {"x, точка разбиття", "t, часовий шар", "p [атм]"},
  PlotStyle -> {Transparent}]
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 3]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
  AxesLabel -> {"x, точка разбиття", "t, часовий шар", "T [°C]"},
  PlotStyle -> {Transparent}]

```

```
totalWorkTime = SessionTime[] - startWorkTime;
```

```
Print["Общее время, затраченное на все расчеты и вывод результатов: ",
  totalWorkTime, " сек = ", N[totalWorkTime/60], " мин."];
```

```
(*-----*)
```

Стационар -----*)

Значения входных параметров:

Число точек разбиения: $n = 5$;

Количество рассматриваемых параметров: $m = 3$;

Начало участка: $l_0 = 0$ км;

Длина участка: $L = 112$ км;

Шаг по иксу: $\Delta x = 22.4$ км;

Внутренний диаметр участка газопровода: $D = 1400$. мм;

Площадь поперечного сечения трубы: $S = 1.53938$ м²;

Давление газа в начале участка: $P_n = 84.6364$ атм.;

Температура газа в начале участка: $t_n = 40$ °C;

Коммерческий расход: $q = 102.266$ млн. м³ в сутки;

Удельная теплоемкость газа: $C_p = 0.655952 \frac{\text{ккал}}{\text{кгК}}$;

Толщина стенок трубы: $\delta = 10$ мм;

Относительная плотность газа по воздуху: $\Delta = 0.604707$;

Коэффициент эффективности участка: $E = 0.95$;

Температура грунта: $t_{rp} = 10$. °C;

Коэффициент теплопередачи от трубы к грунту: $K = 1.4 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^3 \text{чК}}$;

Коэффициент сжимаемости газа в начале участка: $z_n = 0.9$;

Поправочный коэффициент, учитывающий отклонение режима течения газа от квадратичного: $\alpha = 1$;

Коэффициент, учитывающий влияние подкладных колец: $\phi = 1$;

Точность расчета: $\epsilon = 1 \cdot 10^{-6}$

Обозначения:

T_1 - температура газа в точке участка с

координатой l , находящейся на расстоянии l от начала участка газопровода [К]

t_1 - температура газа в точке участка с координатой l , находящейся на расстоянии l от начала участка [°C]

$T_{ср}$ - средняя температура транспортируемого газа по длине участка [К]

P_1 - давление в точке участка с координатой l , находящейся на расстоянии l от начала участка [атм.]

$P_{ср}$ - среднее значение давления газа на участке $[0,1]$

$z_{ср}$ - средний коэффициент сжимаемости газа по длине участка $[0,1]$

$P1Prev$ - промежуточная переменная, равная значению P_1

Стационарный режим:

Точка участка l_i [км]	Массовый расход G [кг/сек]	Давление P [атм]	Температура t [°C]
0	862.481	84.6364	40
22.4	862.481	80.4114	38.0076
44.8	862.481	75.9672	36.1475
67.2	862.481	71.2563	34.411
89.6	862.481	66.214	32.7898
112.	862.481	60.749	31.2763

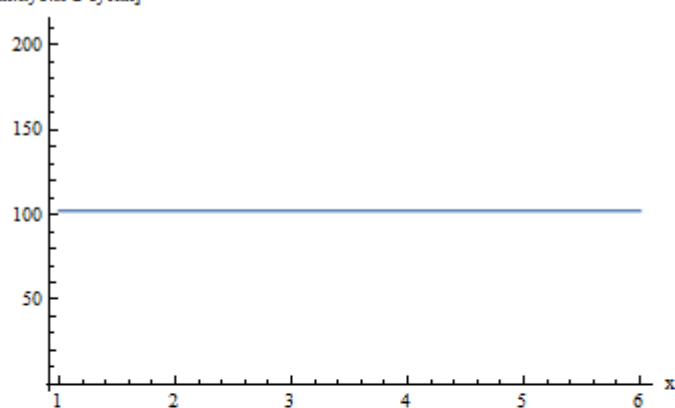
Перевод в систему СИ:

Точка участка l_i [м]	Массовый расход G [кг/сек]	Удельный массовый расход w	Давление P [ПА]	Температура t [K]
0	862.481	560.278	8.29999999×10^6	313.15
22400.	862.481	560.278	7.88566005×10^6	311.158
44800.	862.481	560.278	7.44984188×10^6	309.298
67200.	862.481	560.278	6.98785567×10^6	307.561
89600.	862.481	560.278	6.49337234×10^6	305.94
112000.	862.481	560.278	5.95743955×10^6	304.426

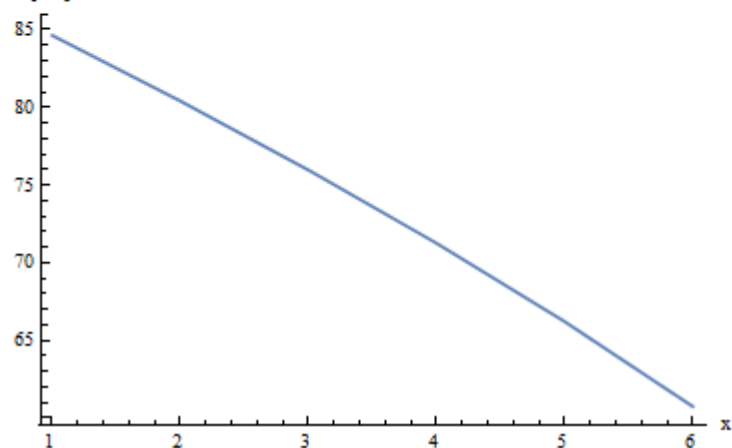
Входные данные для моделирования нестационарного режима:

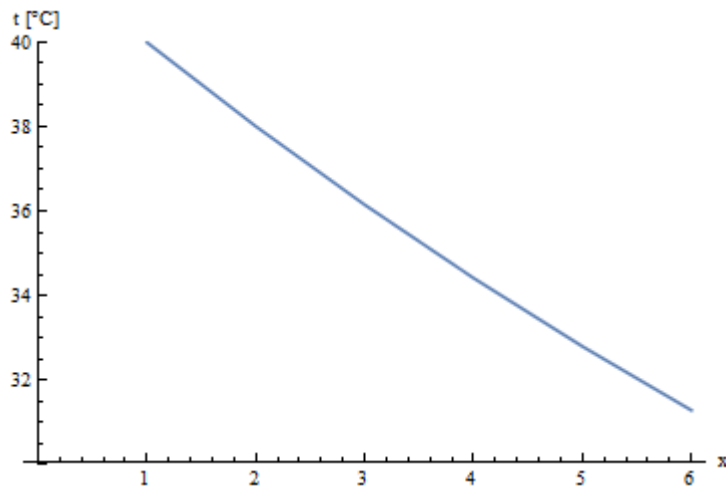
Точка участка l_i [м]	Удельный массовый расход w	Давление P [ПА]	Температура t [K]
0	560.278	8.29999999×10^6	313.15
22400.	560.278	7.88566005×10^6	311.158
44800.	560.278	7.44984188×10^6	309.298
67200.	560.278	6.98785567×10^6	307.561
89600.	560.278	6.49337234×10^6	305.94
112000.	560.278	5.95743955×10^6	304.426

q [млн.куб.м в сутки]



P [атм]





(* -----)

Нестационар ----- *

Значения входных параметров:

Число точек разбиения: $n = 5$;

Начало участка: $l_0 = 0$ м;

Длина участка: $L = 112000$ м;

Шаг по иксу: $\Delta x = 22400$ м;

Шаг по времени: $\tau = 300$ сек;

Общее время моделирования: $time = 43200$ сек;

Количество временных слоев: $timeLayersNumber = 144$;

Внутренний диаметр участка газопровода: $D = 1.4$ м;

Площадь поперечного сечения трубы: $S = 1.53938$ м²;

Удельная теплоемкость газа: $C_p = 2746.34 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$;

Ускорение свободного падения: $g = 9.80665 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$;

Относительная плотность газа по воздуху: $\Delta = 0.604707$;

Универсальная газовая постоянная: $R = 48.3968$;

Коэффициент эффективности участка: $E = 0.95$;

Коэффициент гидравлического сопротивления: $\lambda = 0.00993229$;

Глубина залегания трубы: $h(x) = 1$;

Температура грунта $T_{гр} = 283.15$ К;

Коэффициент теплопередачи от трубы к грунту $K = 1.6282 \frac{\text{Дж}}{\text{SuperscriptBox[m, 3] сек К}}$;

Коэффициент сжимаемости газа: $z = 0.883398$;

Коэффициенты: $\alpha = 272.362$;

$\beta = 0.966137$;

$\gamma = 1.18017$;

Точность расчета $\epsilon = 1. \times 10^{-6}$

Граничные условия: $P_0 = 8.3 \times 10^6$ Па; $T_0 = 313.15$ К; $W_h = 560.278 \frac{\text{кг}}{\text{сек м}^2}$.

На данном временном слое ($k = 1$) получим:

Количество итераций $s = 3$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 104.393745 & 84.6364456 & 40. \\ 103.710498 & 80.4330745 & 38.0301991 \\ 103.948736 & 75.9655544 & 36.1560546 \\ 103.745354 & 71.2629963 & 34.4203464 \\ 103.809875 & 66.2849734 & 32.845742 \\ 102.266 & 60.8964794 & 31.407071 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 571.935 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 568.192 & 7.88779 \times 10^6 & 311.18 \\ 569.497 & 7.44968 \times 10^6 & 309.306 \\ 568.383 & 6.98851 \times 10^6 & 307.57 \\ 568.736 & 6.50034 \times 10^6 & 305.996 \\ 560.278 & 5.9719 \times 10^6 & 304.557 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 2$) получим: На данном временном слое ($k = 3$) получим:

Количество итераций $s = 2$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 104.30902 & 84.6364456 & 40. \\ 103.735179 & 80.4490091 & 38.0474677 \\ 103.982569 & 75.9743956 & 36.1719715 \\ 103.552953 & 71.2875688 & 34.4408018 \\ 103.473252 & 66.34675 & 32.8863967 \\ 102.266 & 61.0118551 & 31.4980901 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 571.471 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 568.327 & 7.88935 \times 10^6 & 311.197 \\ 569.683 & 7.45054 \times 10^6 & 309.322 \\ 567.329 & 6.99092 \times 10^6 & 307.591 \\ 566.892 & 6.50639 \times 10^6 & 306.036 \\ 560.278 & 5.98322 \times 10^6 & 304.648 \end{pmatrix}$$

Количество итераций $s = 2$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 104.150593 & 84.6364456 & 40. \\ 103.660354 & 80.4619525 & 38.0609343 \\ 103.885434 & 75.9886806 & 36.1905226 \\ 103.365942 & 71.3200238 & 34.4657503 \\ 103.21279 & 66.3995546 & 32.9153478 \\ 102.266 & 61.1023571 & 31.5596916 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 570.603 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 567.917 & 7.89062 \times 10^6 & 311.211 \\ 569.15 & 7.45194 \times 10^6 & 309.341 \\ 566.304 & 6.99411 \times 10^6 & 307.616 \\ 565.465 & 6.51157 \times 10^6 & 306.065 \\ 560.278 & 5.99209 \times 10^6 & 304.71 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 20$) получим:

Количество итераций $s = 2$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.668601 & 84.6364456 & 40. \\ 102.583184 & 80.5791035 & 38.0882749 \\ 102.605811 & 76.1786051 & 36.2557199 \\ 102.47506 & 71.6808423 & 34.6749885 \\ 102.408764 & 66.7934222 & 33.0230529 \\ 102.266 & 61.6747035 & 31.647918 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 562.484 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 562.016 & 7.90211 \times 10^6 & 311.238 \\ 562.14 & 7.47057 \times 10^6 & 309.406 \\ 561.423 & 7.02949 \times 10^6 & 307.825 \\ 561.06 & 6.5502 \times 10^6 & 306.173 \\ 560.278 & 6.04822 \times 10^6 & 304.798 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 38$) получим:

Количество итераций $s = 2$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.344079 & 84.6364456 & 40. \\ 102.330811 & 80.6045256 & 38.0984985 \\ 102.332146 & 76.2223274 & 36.1862172 \\ 102.310373 & 71.7604603 & 34.5578233 \\ 102.295384 & 66.8809553 & 32.9536333 \\ 102.266 & 61.7915465 & 31.5444632 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 560.706 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 560.633 & 7.9046 \times 10^6 & 311.248 \\ 560.64 & 7.47486 \times 10^6 & 309.336 \\ 560.521 & 7.0373 \times 10^6 & 307.708 \\ 560.439 & 6.55878 \times 10^6 & 306.104 \\ 560.278 & 6.05968 \times 10^6 & 304.694 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 39$) получим:

Количество итераций $s = 2$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.337265 & 84.6364456 & 40. \\ 102.325425 & 80.6050587 & 38.0995437 \\ 102.326346 & 76.2232361 & 36.1870759 \\ 102.306698 & 71.7620713 & 34.5522249 \\ 102.292966 & 66.8829092 & 32.947217 \\ 102.266 & 61.7941239 & 31.537612 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 560.669 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 560.604 & 7.90466 \times 10^6 & 311.25 \\ 560.609 & 7.47495 \times 10^6 & 309.337 \\ 560.501 & 7.03746 \times 10^6 & 307.702 \\ 560.426 & 6.55897 \times 10^6 & 306.097 \\ 560.278 & 6.05993 \times 10^6 & 304.688 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 41$) получим:

Количество итераций $s = 3$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.842827 & 84.6364456 & 40. \\ 103.225337 & 80.5632408 & 38.0853428 \\ 103.422665 & 76.0652152 & 36.0918254 \\ 105.189581 & 71.5059554 & 34.4071568 \\ 106.606007 & 66.1458412 & 32.4603142 \\ 112.266 & 60.5519168 & 30.6177776 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 563.438 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 565.534 & 7.90056 \times 10^6 & 311.235 \\ 566.615 & 7.45945 \times 10^6 & 309.242 \\ 576.295 & 7.01234 \times 10^6 & 307.557 \\ 584.055 & 6.48669 \times 10^6 & 305.61 \\ 615.064 & 5.93811 \times 10^6 & 303.768 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 43$) получим:

Количество итераций $s = 3$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 103.874485 & 84.6364456 & 40. \\ 104.480152 & 80.4800039 & 38.065729 \\ 104.786166 & 75.8459354 & 35.984893 \\ 106.768495 & 71.1580832 & 34.2372834 \\ 108.422847 & 65.5861908 & 32.2047258 \\ 112.266 & 59.7507656 & 30.1934795 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 569.09 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 572.409 & 7.89239 \times 10^6 & 311.216 \\ 574.085 & 7.43795 \times 10^6 & 309.135 \\ 584.946 & 6.97822 \times 10^6 & 307.387 \\ 594.009 & 6.43181 \times 10^6 & 305.355 \\ 615.064 & 5.85955 \times 10^6 & 303.343 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 40$) получим:

Количество итераций $s = 3$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 102.49727 & 84.6364456 & 40. \\ 102.678291 & 80.5915471 & 38.0947447 \\ 102.774038 & 76.1604908 & 36.1473129 \\ 103.971642 & 71.6595221 & 34.4911883 \\ 104.899236 & 66.485052 & 32.6632601 \\ 112.266 & 61.0912731 & 30.9862941 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 561.545 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 562.537 & 7.90333 \times 10^6 & 311.245 \\ 563.061 & 7.46879 \times 10^6 & 309.297 \\ 569.623 & 7.0274 \times 10^6 & 307.641 \\ 574.705 & 6.51996 \times 10^6 & 305.813 \\ 615.064 & 5.99101 \times 10^6 & 304.136 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 42$) получим:

Количество итераций $s = 3$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 103.321761 & 84.6364456 & 40. \\ 103.847194 & 80.5245072 & 38.0747225 \\ 104.115221 & 75.9568931 & 36.0352569 \\ 106.080819 & 71.3334225 & 34.3194663 \\ 107.692738 & 65.8494953 & 32.3128007 \\ 112.266 & 60.1164787 & 30.3664631 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 566.062 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 568.941 & 7.89676 \times 10^6 & 311.225 \\ 570.409 & 7.44883 \times 10^6 & 309.185 \\ 581.178 & 6.99542 \times 10^6 & 307.469 \\ 590.009 & 6.45763 \times 10^6 & 305.463 \\ 615.064 & 5.89541 \times 10^6 & 303.516 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 44$) получим:

Количество итераций $s = 3$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 104.454803 & 84.6364456 & 40. \\ 105.092445 & 80.433285 & 38.0600776 \\ 105.411889 & 75.7377138 & 35.9440428 \\ 107.324655 & 70.9878933 & 34.1647018 \\ 108.942601 & 65.3495848 & 32.1258322 \\ 112.266 & 59.4346355 & 30.0751342 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 572.27 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 575.763 & 7.88781 \times 10^6 & 311.21 \\ 577.513 & 7.42733 \times 10^6 & 309.094 \\ 587.993 & 6.96153 \times 10^6 & 307.315 \\ 596.857 & 6.40861 \times 10^6 & 305.276 \\ 615.064 & 5.82855 \times 10^6 & 303.225 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 50$) получим:

Количество итераций $s = 3$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 107.472863 & 84.6364456 & 40. \\ 107.948209 & 80.1877366 & 38.1021634 \\ 108.175256 & 75.2196359 & 35.9098503 \\ 109.397397 & 70.1762147 & 33.960053 \\ 110.462215 & 64.3125853 & 31.9950873 \\ 112.266 & 58.1173278 & 29.937951 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 588.805 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 591.409 & 7.86373 \times 10^6 & 311.252 \\ 592.653 & 7.37653 \times 10^6 & 309.06 \\ 599.348 & 6.88194 \times 10^6 & 307.11 \\ 605.182 & 6.30691 \times 10^6 & 305.145 \\ 615.064 & 5.69936 \times 10^6 & 303.088 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 70$) получим:

Количество итераций $s = 2$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 111.296771 & 84.6364456 & 40. \\ 111.405012 & 79.8672593 & 38.2066477 \\ 111.433422 & 74.5661741 & 36.4951239 \\ 111.679663 & 69.1335803 & 34.6629745 \\ 111.886543 & 63.0048991 & 32.8338167 \\ 112.266 & 56.4736414 & 31.0931189 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 609.754 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 610.347 & 7.8323 \times 10^6 & 311.357 \\ 610.503 & 7.31244 \times 10^6 & 309.645 \\ 611.852 & 6.77969 \times 10^6 & 307.813 \\ 612.986 & 6.17867 \times 10^6 & 305.984 \\ 615.064 & 5.53817 \times 10^6 & 304.243 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 90$) получим:

Количество итераций $s = 2$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.064212 & 84.6364456 & 40. \\ 112.086781 & 79.8015694 & 38.1854705 \\ 112.093431 & 74.4353288 & 36.4656045 \\ 112.147407 & 68.9228725 & 34.9040116 \\ 112.18772 & 62.7328102 & 33.3747082 \\ 112.266 & 56.1174918 & 31.9137111 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 613.959 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 614.083 & 7.82586 \times 10^6 & 311.335 \\ 614.119 & 7.29961 \times 10^6 & 309.616 \\ 614.415 & 6.75902 \times 10^6 & 308.054 \\ 614.636 & 6.15199 \times 10^6 & 306.525 \\ 615.064 & 5.50325 \times 10^6 & 305.064 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 60$) получим:

Количество итераций $s = 2$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 110.145437 & 84.6364456 & 40. \\ 110.365397 & 79.9649541 & 38.220006 \\ 110.449181 & 74.7641178 & 36.2543947 \\ 110.990429 & 69.4552454 & 34.2194528 \\ 111.458535 & 63.4134331 & 32.3211674 \\ 112.266 & 56.9929051 & 30.4401221 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 603.447 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 604.652 & 7.84188 \times 10^6 & 311.37 \\ 605.111 & 7.33186 \times 10^6 & 309.404 \\ 608.076 & 6.81123 \times 10^6 & 307.369 \\ 610.641 & 6.21873 \times 10^6 & 305.471 \\ 615.064 & 5.58909 \times 10^6 & 303.59 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 80$) получим:

Количество итераций $s = 2$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 111.821396 & 84.6364456 & 40. \\ 111.872629 & 79.8224002 & 38.1700532 \\ 111.88506 & 74.4772773 & 36.5020213 \\ 111.999352 & 68.9887645 & 34.8884635 \\ 112.089267 & 62.8171838 & 33.2271225 \\ 112.266 & 56.2289696 & 31.6279647 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 612.629 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 612.909 & 7.8279 \times 10^6 & 311.32 \\ 612.977 & 7.30373 \times 10^6 & 309.652 \\ 613.604 & 6.76549 \times 10^6 & 308.038 \\ 614.096 & 6.16026 \times 10^6 & 306.377 \\ 615.064 & 5.51418 \times 10^6 & 304.778 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 100$) получим:

Количество итераций $s = 1$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.173627 & 84.6364456 & 40. \\ 112.183741 & 79.7921691 & 38.2150395 \\ 112.186625 & 74.4155673 & 36.483968 \\ 112.211426 & 68.8919194 & 34.8935779 \\ 112.231516 & 62.6949057 & 33.3806914 \\ 112.266 & 56.068633 & 31.9957401 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 614.558 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 614.614 & 7.82494 \times 10^6 & 311.365 \\ 614.63 & 7.29767 \times 10^6 & 309.634 \\ 614.765 & 6.75599 \times 10^6 & 308.044 \\ 614.876 & 6.14827 \times 10^6 & 306.531 \\ 615.064 & 5.49845 \times 10^6 & 305.146 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 110$) получим:

Количество итераций $s = 1$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.222576 & 84.6364456 & 40. \\ 112.227057 & 79.7879603 & 38.2239585 \\ 112.228516 & 74.4068712 & 36.5130832 \\ 112.238914 & 68.8773048 & 34.9260927 \\ 112.249227 & 62.6767782 & 33.3836117 \\ 112.266 & 56.046177 & 32.0117902 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 614.827 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 614.851 & 7.82453 \times 10^6 & 311.374 \\ 614.859 & 7.29682 \times 10^6 & 309.663 \\ 614.916 & 6.75456 \times 10^6 & 308.076 \\ 614.973 & 6.14649 \times 10^6 & 306.534 \\ 615.064 & 5.49625 \times 10^6 & 305.162 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 130$) получим:

Количество итераций $s = 1$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.256741 & 84.6364456 & 40. \\ 112.256775 & 79.7850213 & 38.2283779 \\ 112.258073 & 74.4009496 & 36.5066269 \\ 112.260089 & 68.8679997 & 34.9620981 \\ 112.262112 & 62.6634972 & 33.4298541 \\ 112.266 & 56.0292934 & 32.0596125 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 615.014 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 615.014 & 7.82424 \times 10^6 & 311.378 \\ 615.021 & 7.29624 \times 10^6 & 309.657 \\ 615.032 & 6.75364 \times 10^6 & 308.112 \\ 615.043 & 6.14519 \times 10^6 & 306.58 \\ 615.064 & 5.4946 \times 10^6 & 305.21 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 144$) получим:

Количество итераций $s = 1$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.262524 & 84.6364456 & 40. \\ 112.262634 & 79.7845232 & 38.2377633 \\ 112.262905 & 74.3995122 & 36.5115051 \\ 112.263826 & 68.8661837 & 34.957146 \\ 112.264764 & 62.6611624 & 33.4296764 \\ 112.266 & 56.0264055 & 32.068003 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 615.045 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 615.046 & 7.82419 \times 10^6 & 311.388 \\ 615.047 & 7.2961 \times 10^6 & 309.662 \\ 615.053 & 6.75347 \times 10^6 & 308.107 \\ 615.058 & 6.14496 \times 10^6 & 306.58 \\ 615.064 & 5.49431 \times 10^6 & 305.218 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 120$) получим:

Количество итераций $s = 1$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.245665 & 84.6364456 & 40. \\ 112.24702 & 79.7859742 & 38.223227 \\ 112.248546 & 74.403014 & 36.514901 \\ 112.252713 & 68.8708092 & 34.9579771 \\ 112.257421 & 62.6677316 & 33.4109403 \\ 112.266 & 56.034827 & 32.0355776 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 614.953 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 614.96 & 7.82433 \times 10^6 & 311.373 \\ 614.969 & 7.29644 \times 10^6 & 309.665 \\ 614.992 & 6.75392 \times 10^6 & 308.108 \\ 615.017 & 6.14561 \times 10^6 & 306.561 \\ 615.064 & 5.49514 \times 10^6 & 305.186 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 140$) получим:

Количество итераций $s = 1$

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 112.261538 & 84.6364456 & 40. \\ 112.261539 & 79.7846083 & 38.2359903 \\ 112.26208 & 74.3997805 & 36.5085052 \\ 112.263254 & 68.8665735 & 34.9570841 \\ 112.26437 & 62.6616181 & 33.4308351 \\ 112.266 & 56.0269291 & 32.067893 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 615.04 & 8.3 \times 10^6 & 313.15 \\ 615.04 & 7.8242 \times 10^6 & 311.386 \\ 615.043 & 7.29613 \times 10^6 & 309.659 \\ 615.049 & 6.7535 \times 10^6 & 308.107 \\ 615.056 & 6.14501 \times 10^6 & 306.581 \\ 615.064 & 5.49436 \times 10^6 & 305.218 \end{pmatrix}$$

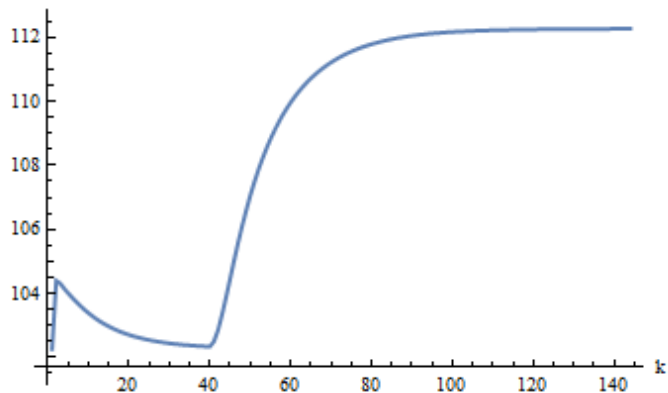
Время, затраченное на все расчеты и вывод результатов: без графиков

9.9829520 сек = 0.166383 мин.

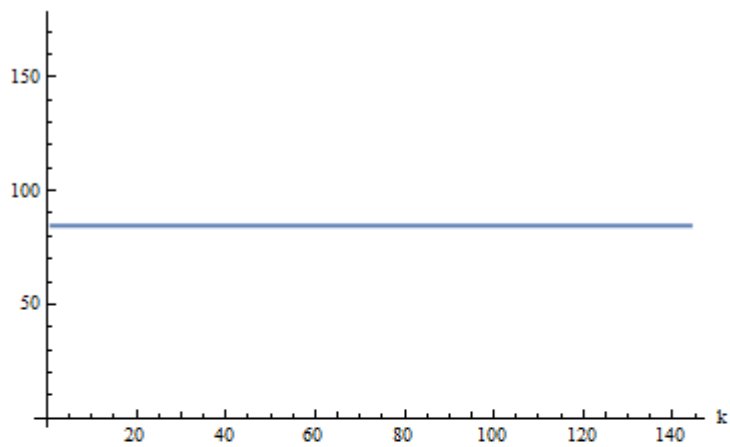
(*----- Графики -----*)

(*----- Результаты в 0 точке разбиения -----*)

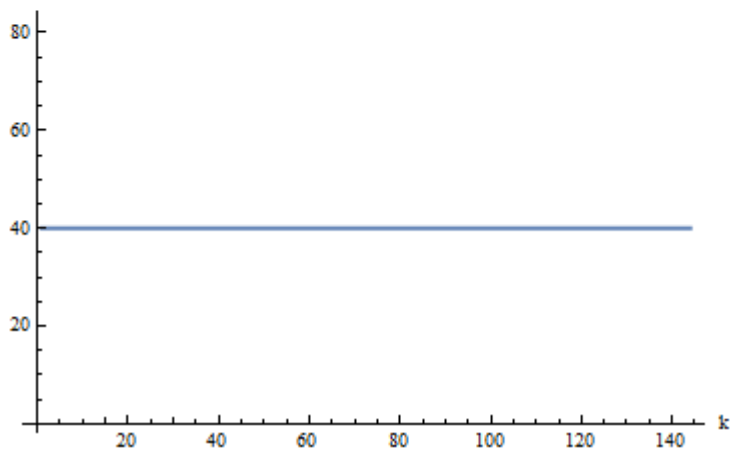
q (млн.куб.м в сутки)



P (атм)

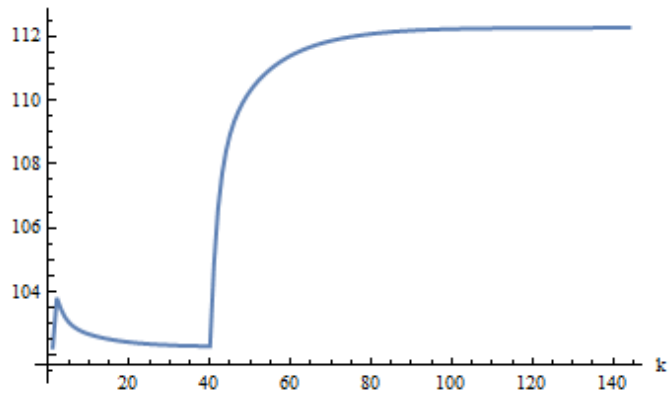


t (°C)

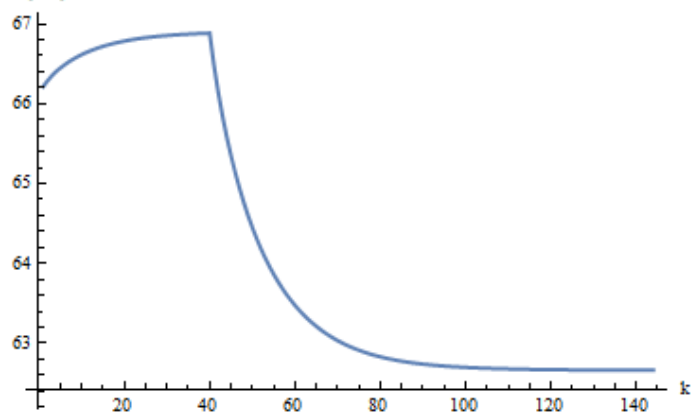


(* ----- Результаты в 4 точке разбиения ----- *)

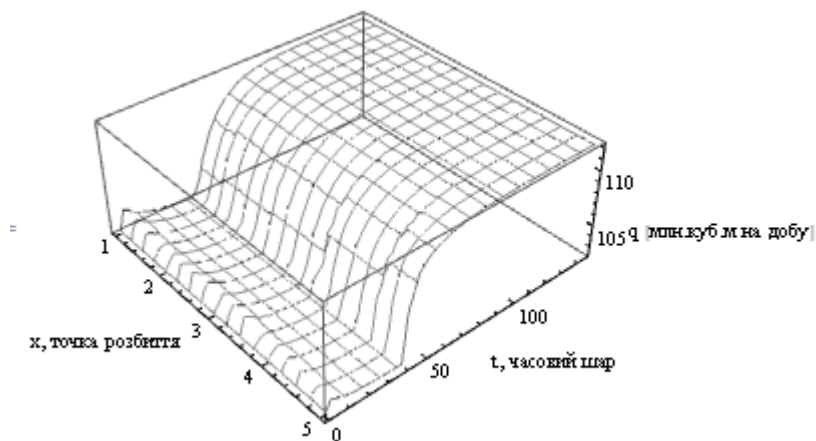
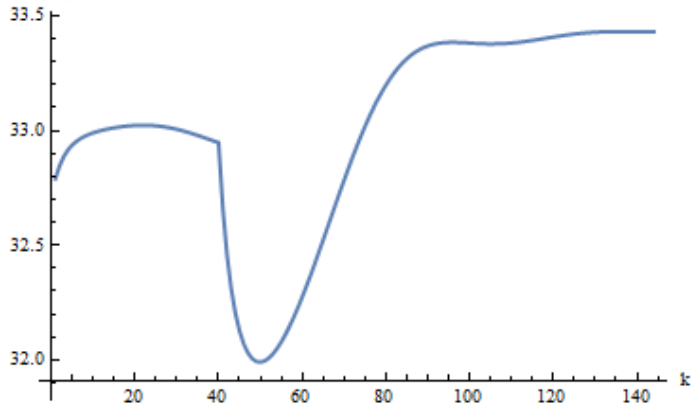
q [млн.куб.м в сутки]

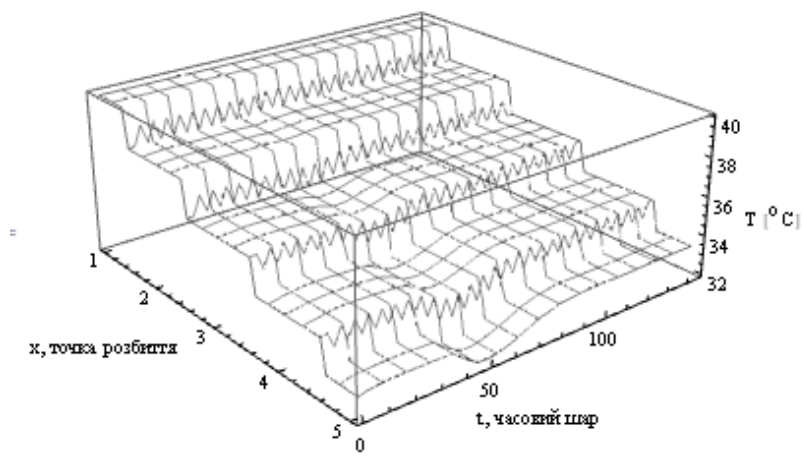
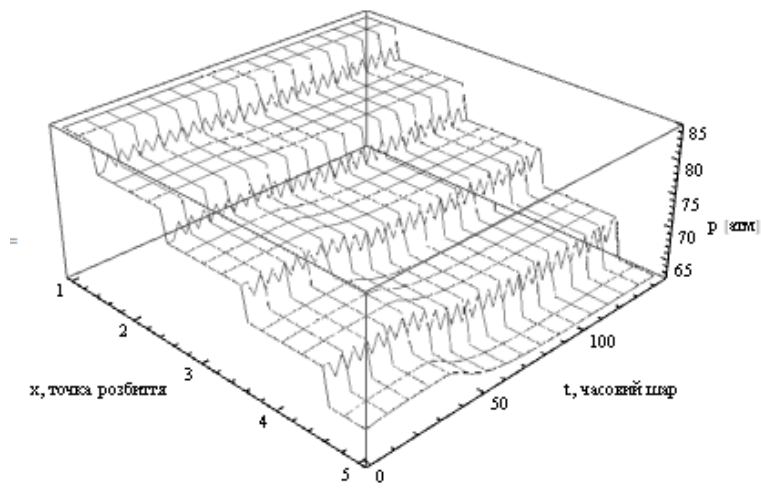


P (атм)



t [°C]





Общее время, затраченное на все расчеты и вывод результатов: 11.4076157 сек = 0.190127 мин.

= iterationCount

= 262

ВІДОМІСТЬ АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Позначення	Найменування	Дод. відомості
	Текстові документи	
1	Пояснювальна записка	с.
2	Презентаційний матеріал	с.
	Інші документи	
3	Роздруківки програм	с.
4	Рецензія	с.
5	Відгук керівника	с.

					Застосування методу Бройдена при комп'ютерному моделюванні нестационарних режимів по ділянці трубопроводу			
Змін	Арк.	Номер докум.	Підп.	Дата				
Розроб.		Соловйов О.М.			(Тема роботи) Відомість атестацій- ної роботи		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Гусарова І.Г.						
Н. контр.		Сидоров М.В.				ХНУРЕ		
Затв.		Тевяшев А.Д.				кафедра ПМ		