

ДОДАТОК А

Код програми розрахунку ННРТГ по ДТ з використанням
спрощеного методу Ньютона

```
(*Произведем разбиение рассматриваемого участка с началом в точке 10 длиной L на
n участков*)
n = 7; (*число точек разбиения на участки : n-2 уч.длины Δ + 2 уч.длины Δ/2 *)
(*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*)
```

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

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

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

```
m = Dimensions[φ[{W, P, T}]][[1]]; (*размерность вектора φ*)
|размеры массива
```

```
(*для теоретических выкладок сформируем вектора переменных,
соответствующих параметрам в каждом точке разбиения рассматриваемого отрезка*)
WPTmas = {}; (*массив параметров W,P и T во всех точках разбиения (в символьном виде)*)
For[i = 0, i ≤ n, i++,
|цикл ДЛЯ
```

```

{
    (* AppendTo[имя списка, элемент] - добавить в конец заданного списка указанный элемент
       StringJoin["строка 1","строка 2", ..] -
       создать новую строку как объединение заданных строк
       ToString[выражение] - перевод выражения в строку (например, перевод цифр в символы).
       Здесь нужно,
       чтобы перевести индекс параметров в символьный вид
       и соединить этот индекс с названием параметра при помощи
       StringJoin["параметр","индекс"]
       ToExpression[строка] - переводит строку в выражение
       (для того чтобы можно было бы брать
       производные по этим переменным - просто по строке, полученной
       из ToString[], этого не выйдет)*)

    AppendTo[WPTmas, {
        |добавить в конец к
        ToExpression[StringJoin["W", ToString[i]]],
        |создать выраж... |соединить строки |преобразовать в строку
        ToExpression[StringJoin["P", ToString[i]]],
        |создать выраж... |соединить строки |преобразовать в строку
        ToExpression[StringJoin["T", ToString[i]]]};
        |создать выраж... |соединить строки |преобразовать в строку
    }];
    Print["Вектора параметров W,P и T во всех точках разбиения: ", WPTmas];
    |печатать

     $\delta$ WPTmas = {}; (*массив искомых поправок к неизвестным (символьный вид)*)
    For[i = 0, i ≤ n, i++,
        |цикл для
        {
            AppendTo[ $\delta$ WPTmas, {
                |добавить в конец к
                |соединить строки |преобразовать в строку
                ToExpression[StringJoin[" $\delta$ W", ToString[i]]],
                |создать выраж... |соединить строки |преобразовать в строку
                ToExpression[StringJoin[" $\delta$ P", ToString[i]]],
                |создать выраж... |соединить строки |преобразовать в строку
                ToExpression[StringJoin[" $\delta$ T", ToString[i]]]};
                |создать выраж... |соединить строки |преобразовать в строку
            }];
            Print["Вектора поправок к неизвестным:"];
            |печатать
             $\delta$ WPTmas

            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}, {W6, P6, T6}, {W7, P7, T7}}

            Вектора поправок к неизвестным:
            {{ $\delta$ W0,  $\delta$ P0,  $\delta$ T0}, { $\delta$ W1,  $\delta$ P1,  $\delta$ T1}, { $\delta$ W2,  $\delta$ P2,  $\delta$ T2}, { $\delta$ W3,  $\delta$ P3,  $\delta$ T3},
                { $\delta$ W4,  $\delta$ P4,  $\delta$ T4}, { $\delta$ W5,  $\delta$ P5,  $\delta$ T5}, { $\delta$ W6,  $\delta$ P6,  $\delta$ T6}, { $\delta$ W7,  $\delta$ P7,  $\delta$ T7}}

```

```
Print["Вектор невязок:"];
```

```
|печатать
```

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

```
|цикл Для
```

```
|печатать
```

```
|матричная форма
```

Вектор невязок:

$$\begin{aligned}
 & \left(\begin{aligned}
 & -\frac{2 \left(\frac{2 S T_0 W_0^2 \alpha}{P_0} + P_0 \left(1 - \frac{S T_0 W_0^2 \alpha}{P_0^2} \right) \right)}{\Delta} + \frac{2 \left(\frac{2 S T_0 W_0 W_1 \alpha}{P_0} + P_1 \left(1 - \frac{S T_0 W_0^2 \alpha}{P_0^2} \right) \right)}{\Delta} + \frac{W_0}{\tau} - \frac{W_{0k1}}{\tau} + \frac{S T_0 W_0 \beta \text{Abs}[W_0]}{P_0} + \frac{g P_0 h'(x)}{S T_0 \alpha} \\
 & - \frac{2 S T_0 W_0 \alpha}{\Delta} + \frac{2 S T_0 W_1 \alpha}{\Delta} + \frac{P_0}{\tau} - \frac{P_{0k1}}{\tau} \\
 & \frac{4 K T_0 (T_0 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_0} = \frac{2 \left(\frac{S T_0^2 W_0 \alpha (-1 + \gamma)}{P_0} + \frac{S T_0^2 W_0 \alpha \gamma}{P_0} \right)}{\Delta} + \frac{2 \left(\frac{S T_0^2 W_1 \alpha (-1 + \gamma)}{P_0} + \frac{S T_0 T_1 W_0 \alpha \gamma}{P_0} \right)}{\Delta} + \frac{T_0}{\tau} - \frac{T_{0k1}}{\tau} + \frac{g T_0 W_0 (-1 + \gamma) h'(x)}{P_0}
 \end{aligned} \right) \\
 & \left(\begin{aligned}
 & -\frac{2 S T_1 W_0 W_1 \alpha}{P_1} + P_0 \left(1 - \frac{S T_1 W_1^2 \alpha}{P_1^2} \right) + \frac{2 S T_1 W_1 W_2 \alpha}{P_1} + P_2 \left(1 - \frac{S T_1 W_1^2 \alpha}{P_1^2} \right) + \frac{W_1}{\tau} - \frac{W_{1k1}}{\tau} + \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}{\Delta} + \frac{S T_1 W_2 \alpha}{\Delta} + \frac{P_1}{\tau} - \frac{P_{1k1}}{\tau} \\
 & \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}{\tau} - \frac{T_{1k1}}{\tau} + \frac{g T_1 W_1 (-1 + \gamma) h'(x)}{P_1}
 \end{aligned} \right) \\
 & \left(\begin{aligned}
 & -\frac{4 \left(\frac{2 S T_2 W_1 W_2 \alpha}{P_2} + P_1 \left(1 - \frac{S T_2 W_2^2 \alpha}{P_2^2} \right) \right)}{3 \Delta} + \frac{2 S T_2 W_2^2 \alpha}{P_2} + P_2 \left(1 - \frac{S T_2 W_2^2 \alpha}{P_2^2} \right) + \frac{2 S T_2 W_2 W_3 \alpha}{P_2} + P_3 \left(1 - \frac{S T_2 W_2^2 \alpha}{P_2^2} \right) + \frac{W_2}{\tau} - \frac{W_{2k1}}{\tau} + \frac{S T_2 W_2 \beta \text{Abs}[W_2]}{P_2} \\
 & - \frac{4 S T_2 W_1 \alpha}{3 \Delta} + \frac{S T_2 W_2 \alpha}{\Delta} + \frac{S T_2 W_3 \alpha}{3 \Delta} + \frac{P_2}{\tau} - \frac{P_{2k1}}{\tau} \\
 & \frac{4 K T_2 (T_2 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{\text{Diam } P_2} = \frac{4 \left(\frac{S T_2^2 W_1 \alpha (-1 + \gamma)}{P_2} + \frac{S T_1 T_2 W_2 \alpha \gamma}{P_2} \right)}{3 \Delta} + \frac{S T_2^2 W_2 \alpha (-1 + \gamma)}{P_2} + \frac{S T_2^2 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}{\tau} - \frac{T_{2k1}}{\tau}
 \end{aligned} \right) \\
 & \left(\begin{aligned}
 & -\frac{2 S T_3 W_2 W_3 \alpha}{P_3} + P_2 \left(1 - \frac{S T_3 W_3^2 \alpha}{P_3^2} \right) + \frac{2 S T_3 W_3 W_4 \alpha}{P_3} + P_4 \left(1 - \frac{S T_3 W_3^2 \alpha}{P_3^2} \right) + \frac{W_3}{\tau} - \frac{W_{3k1}}{\tau} + \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}{\tau} - \frac{P_{3k1}}{\tau} \\
 & \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}{\tau} - \frac{T_{3k1}}{\tau} + \frac{g T_3 W_3 (-1 + \gamma) h'(x)}{P_3}
 \end{aligned} \right) \\
 & \left(\begin{aligned}
 & -\frac{2 S T_4 W_3 W_4 \alpha}{P_4} + P_3 \left(1 - \frac{S T_4 W_4^2 \alpha}{P_4^2} \right) + \frac{2 S T_4 W_4 W_5 \alpha}{P_4} + P_5 \left(1 - \frac{S T_4 W_4^2 \alpha}{P_4^2} \right) + \frac{W_4}{\tau} - \frac{W_{4k1}}{\tau} + \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}{\tau} - \frac{P_{4k1}}{\tau} \\
 & \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}{\tau} - \frac{T_{4k1}}{\tau} + \frac{g T_4 W_4 (-1 + \gamma) h'(x)}{P_4}
 \end{aligned} \right) \\
 & \left(\begin{aligned}
 & -\frac{2 S T_5 W_4 W_5 \alpha}{P_5} + P_4 \left(1 - \frac{S T_5 W_5^2 \alpha}{P_5^2} \right) + \frac{2 S T_5 W_5^2 \alpha}{P_5} + P_5 \left(1 - \frac{S T_5 W_5^2 \alpha}{P_5^2} \right) + \frac{4 \left(\frac{2 S T_5 W_5 W_6 \alpha}{P_5} + P_6 \left(1 - \frac{S T_5 W_5^2 \alpha}{P_5^2} \right) \right)}{3 \Delta} + \frac{W_5}{\tau} - \frac{W_{5k1}}{\tau} + \frac{S T_5 W_5 \beta \text{Abs}[W_5]}{P_5} \\
 & - \frac{S T_5 W_4 \alpha}{3 \Delta} - \frac{S T_5 W_5 \alpha}{\Delta} + \frac{4 S T_5 W_6 \alpha}{3 \Delta} + \frac{P_5}{\tau} - \frac{P_{5k1}}{\tau} \\
 & \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{4 \left(\frac{S T_5^2 W_6 \alpha (-1 + \gamma)}{P_5} + \frac{S T_5 T_6 W_5 \alpha \gamma}{P_5} \right)}{3 \Delta} + \frac{T_5}{\tau} - \frac{T_{5k1}}{\tau}
 \end{aligned} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\frac{2 S T_6 W_5 W_6 \alpha}{P_6} + P_5 \left(1 - \frac{S T_6 W_6^2 \alpha}{P_6^2} \right)}{\Delta} + \frac{\frac{2 S T_6 W_6 W_7 \alpha}{P_6} + P_7 \left(1 - \frac{S T_6 W_6^2 \alpha}{P_6^2} \right)}{\Delta} + \frac{W_6}{\tau} - \frac{W_{lk1}}{\tau} + \frac{S T_6 W_6 \beta Abs[W_6]}{P_6} + \frac{g P_6 h'(x)}{S T_6 \alpha} \\
 &\quad - \frac{S T_6 W_5 \alpha}{\Delta} + \frac{S T_6 W_7 \alpha}{\Delta} + \frac{P_6}{\tau} - \frac{P_{lk1}}{\tau} \\
 &\frac{4 K T_6 (T_6 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{Diam P_6} = \frac{\frac{S T_6^2 W_5 \alpha (-1 + \gamma)}{P_6} + \frac{S T_5 T_6 W_6 \alpha \gamma}{P_6}}{\Delta} + \frac{\frac{S T_6^2 W_7 \alpha (-1 + \gamma)}{P_6} + \frac{S T_6 T_7 W_6 \alpha \gamma}{P_6}}{\Delta} + \frac{T_6}{\tau} - \frac{T_{lk1}}{\tau} + \frac{g T_6 W_6 (-1 + \gamma) h'(x)}{P_6} \\
 &= \frac{2 \left(\frac{2 S T_7 W_6 W_7 \alpha}{P_7} + P_6 \left(1 - \frac{S T_7 W_7^2 \alpha}{P_7^2} \right) \right)}{\Delta} + \frac{2 \left(\frac{2 S T_7 W_7^2 \alpha}{P_7} + P_7 \left(1 - \frac{S T_7 W_7^2 \alpha}{P_7^2} \right) \right)}{\Delta} + \frac{W_7}{\tau} - \frac{W_{nk1}}{\tau} + \frac{S T_7 W_7 \beta Abs[W_7]}{P_7} + \frac{g P_7 h'(x)}{S T_7 \alpha} \\
 &\quad - \frac{2 S T_7 W_6 \alpha}{\Delta} + \frac{2 S T_7 W_7 \alpha}{\Delta} + \frac{P_7}{\tau} - \frac{P_{nk1}}{\tau} \\
 &\frac{4 K T_7 (T_7 - T_{gr}) (-1 + \gamma)}{Diam P_7} = \frac{2 \left(\frac{S T_7^2 W_6 \alpha (-1 + \gamma)}{P_7} + \frac{S T_6 T_7 W_7 \alpha \gamma}{P_7} \right)}{\Delta} + \frac{2 \left(\frac{S T_7^2 W_7 \alpha (-1 + \gamma)}{P_7} + \frac{S T_7^2 W_7 \alpha \gamma}{P_7} \right)}{\Delta} + \frac{T_7}{\tau} - \frac{T_{nk1}}{\tau} + \frac{g T_7 W_7 (-1 + \gamma) h'(x)}{P_7}
 \end{aligned}$$

(*температура грунта[°C]*)

trp = 12;

(*коэффициент теплопередачи от трубы к грунту[ккал/м.куб.ч.К]*)

K = 1.4;

(*коэффициент эффективности участка*)

Ef = 0.95;

(*поправочный коэффициент, учитывающий отклонение режима течения газа от квадратичного*)

αcoef = 1;

(*коэффициент, учитывающий влияние подкладных колец*)

φcoef = 1;

(*удельная теплоемкость газа[ккал/кг*К]*)

Cr = 0.656;

(*относительная плотность газа по воздуху*)

Δvar = 0.6047;

(*точность расчета*)

ε = 10⁻⁶;

(*2. Находим наружный диаметр участка газопровода [мм]*)

DH = Diam + 2 δ;

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

(*3.1*)

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

(*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 * Δvar;

(*площадь сечения [м²]*)

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

```

(*удельный массовый расход*)
    GSi
WSi =  $\frac{\quad}{S}$ ;
(*массивы для вывода результатов
(стационарный режим, система СИ, усеченная таблица в системе СИ)*)
masEndRez = {};
masEndRezSi = {};
masEndRezNS = {};
stat = {}; (*массив для передачи в нестационарный режим*)
AppendTo[masEndRez, {"Точка участка", "Массовый расход", "Давление", "Температура"}];
|добавить в конец к
AppendTo[masEndRezSi, {"Точка участка", "Массовый расход", "Удельный массовый расход",
|добавить в конец к
    "Давление", "Температура"}];
AppendTo[masEndRezNS, {"Точка участка", "Удельный массовый расход", "Давление",
    "Температура"}];
AppendTo[masEndRez, {"l1 [км]", "G [кг/сек]", "P [атм]", "t [°C]"}];
|добавить в конец к
AppendTo[masEndRezSi, {"l1 [м]", "G [кг/сек]", "W", "P [ПА]", "t [K]"}];
|добавить в конец к
AppendTo[masEndRezNS, {"l1 [м]", "W", "P [ПА]", "t [K]"}];
|добавить в конец к
AppendTo[masEndRez, {l0, GSi, PH, tH}];
|добавить в конец к
AppendTo[masEndRezSi, {1000 * l0, GSi, WSi, NumberForm[98066.5 * (PH), 9], tH}];|
|добавить в конец к |числовая форма
AppendTo[masEndRezNS, {1000 * l0, WSi, NumberForm[98066.5 * (PH), 9], tH}];
|добавить в конец к |числовая форма
AppendTo[stat, {WSi, 98066.5 * (PH), tH}];
|добавить в конец к
Print[Style["(*----- Стационар -----*)",
|печа... |стиль
    20, FontWeight → Bold]];
|вес шрифта |жирный шрифт
Print[Style["Значения входных параметров:\n", 18, FontWeight → Bold],
|печа... |стиль |вес шрифта |жирный шрифт
    "Число точек разбиения: n = ", n,
    "; \nКоличество рассматриваемых параметров: m = ", m,
    "; \nНачало участка: l0 = ", l0,
    " км; \nДлина участка: L = ", L,
    " км; \nШаг по иксу: Δx = ", N[Δ],
    |численное приближение
    " км; \nВнутренний диаметр участка газопровода: D = ", N[Diam],
    |численное приближение
    " мм; \nПлощадь поперечного сечения трубы: S = ", N[S],
    |численное приближение
    " м2; \nДавление газа в начале участка: Pн = ", PH,
    " атм.; \nТемпература газа в начале участка: tн = ", tH,
    " °C; \nКоммерческий расход: q = ", q,

```

```

" млн. м3 в сутки;\nУдельная теплоемкость газа: Cp = ", N[Cp],
                                     |численное приближение
    ккал
" -----;\nТолщина стенок трубы: δ = ", δ,
    кгК
" мм;\nОтносительная плотность газа по воздуху: Δ = ", N[Δvar],
                                     |численное приближение
";\nКоэффициент эффективности участка: E = ", N[Ef],
                                     |численное приближение
";\nТемпература грунта: tгр = ", N[trp],
                                     |численное приближение
" °C;\nКоэффициент теплопередачи от трубы к грунту: K = ", N[K],
                                     |численное приближение
    ккал
" -----;\nКоэффициент сжимаемости газа в начале участка: zн = ",
    SuperscriptBox[m, 3] чК
N[zH],

";\nПоправочный коэффициент, учитывающий отклонение режима течения газа от
    квадратичного: α = ", αcoef,
";\nКоэффициент, учитывающий влияние подкладных колец: φ = ", φcoef,
";\nТочность расчета: ε = ", N[ε]]];
                                     |численное приближение

Print[Style["Обозначения:\n", 18, FontWeight → Bold],
      |стиль |вес шрифта |жирный шрифт
    "T1 – температура газа в точке участка с координатой 1, находящейся на расстоянии
      1 от начала участка газопровода[K]\n",
    "t1 – температура газа в точке участка с координатой 1, находящейся на расстоянии
      1 от начала участка [°C]\n",
    "Tср – средняя температура транспортируемого газа по длине участка[K]\n",
    "P1 – давление в точке участка с координатой 1, находящейся на расстоянии 1
      от начала участка [атм.]\n", "Pср – среднее значение давления газа на участке[0,1]\n",
    "zср – средний коэффициент сжимаемости газа по длине участка[0,1]\n",
    "P1Prev – промежуточная переменная, равная значению P1\n"
];
For[i = 1, i ≤ n, i++,
  |цикл для
  {
    (*расстояние от начала участка до точки этого участка с координатой 1[км]*)

    Which[i = 0,
      |условный оператор с множественными ветвями
      {
        li = N[Δ * i];
        |численное приближение
      },
      i = 1,
      {
        li = N[Δ * i / 2];
        |численное приближение
      },
      1 < i < n - 1,
      {
        li = N[Δ * (i - 1)];
        |численное приближение
      }
    ]
  }
]

```

```

AppendTo[rez, {"Tl [K]", "tl [°C]", "Tcp [K]", "C", "P1 [атм.]", "Pcp[атм.]",
|добавить в конец к
    "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,l]:*)
(*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,
|цикл... |абсолютное значение
    (*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 =  $\frac{\Delta var * li * Tcp * zcp}{\alpha coef^2 * \phi coef^2 * (1.64 * 10^{-6})^2 * Diam^{5.2} * Ef^2}$ ;
(*3.11*)
    P1 =  $\sqrt{PH^2 - c * Abs[q] * q}$ ;
    If[kf == 0, AppendTo[rez, {NumberForm[Tl, {6, 3}], NumberForm[tl, {6, 4}],
|условный ... |добавить в конец к |числовая форма |числовая форма
        NumberForm[Tcp, {6, 3}], NumberForm[c, {7, 6}], NumberForm[P1, {6, 4}],
|числовая форма |числовая форма |числовая форма
        NumberForm[Pcp, {6, 4}], NumberForm[zcp, {7, 6}], NumberForm[P1Prev, {6, 4}],
|числовая форма |числовая форма |числовая форма
        NumberForm[c, {7, 6}], NumberForm[P1, {6, 4}], Abs[P1Prev - P1]}],
AppendTo[rez, {"", "", "", "", "", NumberForm[Pcp, {6, 4}], NumberForm[zcp, {7, 6}],
|добавить в конец к |числовая форма |числовая форма
        NumberForm[P1Prev, {6, 4}], NumberForm[c, {7, 6}], NumberForm[P1, {6, 4}],
|числовая форма |числовая форма |числовая форма
        Abs[P1Prev - P1]}]];
|абсолютное значение

```

```

Print[
  печатать
  ListLinePlot[qPlotMas, PlotRange → All, AxesLabel → {"x", "q [млн.куб.м в сутки]"},
    линейный график данных | отображаем... | всё | обозначения на осях
    PlotStyle → Thick]];
    стиль графика | жирный
Print[
  печатать
  ListLinePlot[PplotMas, PlotRange → All, AxesLabel → {"x", "P [атм]"}, PlotStyle → Thick]];
  линейный график данных | отображаем... | всё | обозначения на осях | стиль графика | жирный
Print[
  печатать
  ListLinePlot[TplotMas, PlotRange → All (*PlotRange→{30,40}*), AxesLabel → {"x", "t [°C]"},
    линейный график данных | отображаем... | всё | обозначения на осях
    PlotStyle → Thick]];
    стиль графика | жирный

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

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

(*длина участка [м]*)
L = L*1000; (*длина участка*)
l0 = 0; (*начало отрезка*)

$$\Delta = \frac{L - l0}{n - 2};$$
 (*step= $\frac{L}{n}$  - шаг по иксу*)
(*внутренний диаметр участка газопровода [м]*)
Diam = Diam/1000;
(*площадь поперечного сечения трубы [м²]*)

$$S = \frac{\text{Pi (Diam)}^2}{4};$$


(*удельная теплоемкость газа [ккал/кг*К]*)
Cp = Cp*4186.8;
(*Ускорение свободного падения*)
g = 9.80665;
(*относительная плотность газа по воздуху*)
dvar = 0.6047;
(*универсальная газовая постоянная*)

$$R = \frac{287}{\text{dvar} * g};$$

(*коэффициент эффективности участка*)
Ef = 0.95;

$$\lambda = \frac{0.03817}{(\text{Diam} * 1000)^{0.2} * \text{Ef}^2};$$

h[x_] := 1; (*глубина залегания трубы*)

```

```

(*коэффициент сжимаемости газа*)
(*Z=0.9;

$$\alpha = \frac{z \cdot g \cdot R}{S};$$


$$\beta = \frac{\lambda \cdot \alpha}{2 \cdot \text{Diam}};$$


$$\gamma = 1 / \left( 1 - \frac{z \cdot g \cdot R}{C_p} \right);$$

z = zcp;
(*zFun[{W_,P_,T_}] :=

$$1 - \left( \left( \frac{P}{98066.5} - 6 \right) * (0.345 * 10^{-2} * \Delta var - 0.446 * 10^{-3}) + 0.015 \right) * (1.3 - 0.0144 * (T - 282.8));$$


$$\alpha = \frac{z \cdot g \cdot R}{S};$$


$$\beta = \frac{\lambda \cdot \alpha}{2 \cdot \text{Diam}};$$


$$\gamma = 1 / \left( 1 - \frac{z \cdot g \cdot R}{C_p} \right);$$

Tgr = trp + 273.15; (*температура грунта[K]*)
K = K * 1.163; (*коэффициент теплопередачи от трубы к грунту[ккал/м.куб.ч.К]*)
 $\tau = 5 * 60;$  (*шаг по времени - 5 мин*)
time = 12 * 60 * 60; (*общее время моделирования 12*60*60- 12 часов*)
timeLayersNumber =  $\frac{\text{time}}{\tau};$ 
 $\epsilon = 10^{-6};$  (*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 = 83.636; (*[ати.]*)
PSiFirst = 98066.5 * (Pfirst); (*ати → Па*)
Tfirst = 38; (*[°C]*)
TSiFirst = Tfirst + 273.15; (*(температура из градусов Цельсия в Кельвины)*)
Glast = 100.1; (*[млн.куб.м в сутки]*)
(*Glast = 122.266;*) (*[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 (8х3)*)
[массив]
grafSiList = {};

AppendTo[grafSiList, Table[ $\left\{ \text{stat}[[i, 1]] * \frac{S}{13.94676 * \Delta var}, \right.$ 
[добавить в конец к [таблица значений
 $\left. \frac{\text{stat}[[i, 2]]}{98066.5}, \right.$ 
 $\left. \text{stat}[[i, 3]] - 273.15 \right\}, \{i, 1, n + 1\}]]];$ 
fixStat = stat;

```

```

k = 1;
While[k ≤ timelayersNumber,
|цикл-пока
{
  (*Print[Style["(----- Номер временного слоя: k = ",16,FontWeight→Bold],
    Style[k,16,FontWeight→Bold],Style[" -----)",16,FontWeight→Bold]]];
  Print["Данные с предыдущего временного слоя (k = ",k-1,")"];*)
  prevLayerResult = fixStat;
  (*Print[NumberForm[prevLayerResult//MatrixForm,9]]];*)
  s = 0; (*Индекс итераций внутри временного слоя*)
  ψi = {ε * 10 000};
  While[Max[Abs[ψi]] > ε ,
|м... |абсолютное значение
  {
    (*Print["Номер итерации: ",s];*)
    zψCoef = {};
    If[s = 0,
|условный оператор
    {
      (* заменяем нужные значения соответствующими установленными граничными *)
      fixStat[[1, 2]] = PSiFirst;
      fixStat[[1, 3]] = TSiFirst;

      If[k < 44,
|условный оператор
      {

$$\text{fixStat}[[n + 1, 1]] = \frac{100.1 * 13.94676 * \Delta var}{S};$$

      },
      {

$$\text{fixStat}[[n + 1, 1]] = \frac{110.5 * 13.94676 * \Delta var}{S};$$

      }
    }
  }];

```

```

Aall = Array[A, {n + 1, n + 1}, {0, 0}];
      |массив
For[i = 0, i ≤ n, i++,
|цикл ДЛЯ
  For[j = 0, j ≤ n, j++,
|цикл ДЛЯ
    {
      A[i, j] = ConstantArray[0, {m, m}];
      |постоянный массив
    }
  ]
]
(*Print[
  "Скорректированные в соответствии с граничными условиями\ndанные о
  предыдущем временном слое:"];
Print[NumberForm[fixStat//MatrixForm,9]]];*)

},
{
  (*производные*)
  If[s == 1, (* s<6*)
|условный оператор
  {
    For[i = 0, i ≤ n, i++,
|цикл ДЛЯ
      For[j = 0, j ≤ n, j++,
|цикл ДЛЯ
        {
          Which[i == 0,

            M[[2]] = A[n, i][[2]];
            M[[3]] = A[n, i][[3]];
            Aall[[n + 1, i + 1]] = M;
          }
        }
      ]
    ]
  }
]; (* if *)

```

```

(*Print["Уравнения для нахождения новых значений параметров:"];*)
equations = {};
For[i = 1, i ≤ n + 1, ++i, {
|цикл ДЛЯ
    For[j = 1, j ≤ 3, j++, {
|цикл ДЛЯ
        AppendTo[equations, Thread[Sum[Aall[[i, 1]].δWPTmas[[1]], {1, 1, n + 1}][[j]] ==
|добавить в конец к |наниз... |сумма
            ψi[[i]][[j]]]];
    }
}];
(*For[i=1,i≤Length[equations],i++,Print[i," ",equations[[i,1]]]];*)

(*for Solve - формируем систему уравнений в нужном виде*)
equa = equations[[1, 1]];
Do[equa = And[equa, equations[[i, 1]], {i, 2, Length[equations]}];
|оператор... |логическое И |длина
list = {};
For[i = 1, i ≤ Length[WPTmas], i++,
|цикл ДЛЯ |длина
    For[j = 1, j ≤ 3, j++, {
|цикл ДЛЯ
        AppendTo[list, δWPTmas[[i, j]]];
|добавить в конец к
    }
}];
solution = Solve[equa, list];
|решить уравнения
index = 1;

For[i = 1, i ≤ n + 1, i++,
|цикл ДЛЯ
    For[j = 1, j ≤ m, j++,
|цикл ДЛЯ
        {
            result[[i, j]] = solution[[1, index, 2]];
            index++;
        }
    }];
(*Print["Поправки к параметрам в точках разбиения"];
Print[NumberForm[result//MatrixForm,9]];*)
PrefixStat = fixStat;
(*Рассчитываем новые значения параметров*)

```

```

(*Print["Вектор невязок:"];*)
 $\psi_i[[1, 2]] = \{0\};$ 
 $\psi_i[[1, 3]] = \{0\};$ 
 $\psi_i[[n + 1, 1]] = \{0\};$ 
(*Print[NumberForm[ $\psi_i$ //MatrixForm,9]];*)

(*If[Max[Abs[ $\psi_i$ ]]> $\epsilon$  ,Print["Максимальная невязка: ",Max[Abs[ $\psi_i$ ]]," > ",N[ $\epsilon$ ],
  ", переходим на следующую итерацию." ],
  Print["Максимальная невязка: ",Max[Abs[ $\psi_i$ ]]," < ",N[ $\epsilon$ ],
  ", заканчиваем итерационный процесс для данного временного слоя."]];*)
s++;
}];
Print["На данном временном слое (k = ", k, ") получим:"];
|печатаТЬ
Print["Количество итераций s: ", s - 1];
|печатаТЬ
(*Print[NumberForm[fixStat//MatrixForm,9]];*)
tempoMas = fixStat;|
Do[{ $\text{tempoMas}[[i, 1]] = \text{tempoMas}[[i, 1]] * \frac{s}{13.94676 * \Delta var}$  ,
|оператор цикла
  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"];
|печатаТЬ
Print[NumberForm[tempoMas // MatrixForm, 9]];
|числовая форма |матричная форма
AppendTo[grafSilist, tempoMas];
|добавить в конец к
Print[fixStat // MatrixForm];
|матричная форма
k++;
}]; While[k]
|цикл-пока

Print["(*----- Сравнение -----*)"];
|печатаТЬ
Print[
|печатаТЬ
  "Сравним результаты, полученные на последнем слое, со стационарным режимом (в
  системе единиц стационарного режима)"];
Print["Стационарный режим:"];
|печатаТЬ
Print[NumberForm[tempoMasStat // MatrixForm, 9]];
|числовая форма |матричная форма
Print["На последнем ", k - 1, "-м временном слое получим:"];
|печатаТЬ
Print[NumberForm[tempoMas // MatrixForm, 9]];
|числовая форма |матричная форма
Print["Максимальная погрешность равна ", Max[Abs[tempoMas - tempoMasStat]]];
|м... |абсолютное значение

```

```

Print["(*----- Графики -----*)"];
|печатать
For[j = 1, j ≤ n + 1, j++,
|цикл ДЛЯ
{
  qPlotMas = {};
  PplotMas = {};
  TplotMas = {};
  Do[{AppendTo[qPlotMas, grafSiList[[i, j, 1]]], AppendTo[PplotMas, grafSiList[[i, j, 2]]],
    |добавить в конец к |добавить в конец к
    AppendTo[TplotMas, grafSiList[[i, j, 3]]], {i, 1, timeLayersNumber}}];
    |добавить в конец к
  Print["(*----- Результаты в ", j - 1,
  |печатать
  " точке разбиения -----*)"];
  Print[ListLinePlot[qPlotMas, PlotRange → {{25, 80}, {60, 130}},
    |линейный график данных |отображаемый диапазон графика
    AxesLabel → {"k", "q [млн.куб.м на добу]"}, PlotStyle → Thick]];
    |стиль графика |жирный
  Print[ListLinePlot[PplotMas, PlotRange → {{25, 90}, {40, 90}}, AxesLabel → {"k", "P [атм]"},
    |линейный график данных |отображаемый диапазон графика |обозначения на осях
    PlotStyle → Thick]];
    |жирный
  Print[ListLinePlot[TplotMas, PlotRange → {{25, 110}, {28, 40}}, AxesLabel → {"k", "t [°C]"},
    |линейный график данных |отображаемый диапазон графика |обозначения на осях
    PlotStyle → Thick]];
    |жирный
}];

Print["(*----- Графики 3D-----*)"];
|печатать
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 1]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
    |округлить |округлить
  AxesLabel → {"x, точка разбиття", "t, часовий шар", "q [млн.куб.м на добу]"},
  |обозначения на осях
  PlotStyle → {Transparent}}
  |прозрачный
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 2]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
  |округлить |округлить
  AxesLabel → {"x, точка разбиття", "t, часовий шар", "p [атм]"},
  |обозначения на осях
  PlotStyle → {Transparent}}
  |прозрачный
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 3]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
  |округлить |округлить
  AxesLabel → {"x, точка разбиття", "t, часовий шар", "T [°C]"},
  |обозначения на осях
  PlotStyle → {Transparent}}
  |прозрачный

```

```
Export[StringJoin["Кинетическая модель – нестационар.txt"], grafSilist];
```

[экспортировать] [соединить строки]

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

[время сеанса работы]

```
Print["Общее время, затраченное на все расчеты и вывод результатов: ", totalWorkTime,
```

[печатать]

```
  " сек = ", N[totalWorkTime/60], " мин. "];
```

[численное приближение]

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

Стационар -----*)

Значения входных параметров:

Число точек разбиения: $n = 7$;

Количество рассматриваемых параметров: $m = 3$;

Начало участка: $l_0 = 0$ км;

Длина участка: $L = 100$ км;

Шаг по иксу: $\Delta x = 20$ км;

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

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

Давление газа в начале участка: $P_n = 83.636$ атм.;

Температура газа в начале участка: $t_n = 38$ °C;

Коммерческий расход: $q = 100.1$ млн. м³ в сутки;

Удельная теплоемкость газа: $C_p = 0.656 \frac{\text{ккал}}{\text{кгK}}$;

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

Относительная плотность газа по воздуху: $\Delta = 0.6047$;

Коэффициент эффективности участка: $E = 0.95$;

Температура грунта: $t_{gp} = 12$ °C;

Коэффициент теплопередачи от трубы к грунту: $K = 1.4 \frac{\text{ккал}}{\text{SuperscriptBox}[m, 3] \text{чK}}$;

Коэффициент сжимаемости газа в начале участка: $z_n = 0.88$;

Поправочный коэффициент, учитывающий

отклонение режима течения газа от квадратичного: $\alpha = 1$;

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

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

Обозначения:

T_l – температура газа в точке участка с координатой

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

t_l – температура газа в точке участка с координатой l ,

находящейся на расстоянии l от начала участка [°C]

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

P_l – давление в точке участка с

координатой l , находящейся на расстоянии l от начала участка [атм.]

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

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

P_{lPrev} – промежуточная переменная, равная значению P_l

Стационарный режим:

Точка участка li [км]	Массовый расход G [кг/сек]	Давление P [атм]	Температура t [°C]
0	844.204	83.636	38
10.	844.204	81.8481	37.1978
20.	844.204	80.0227	36.4203
40.	844.204	76.2465	34.9366
60.	844.204	72.2779	33.543
80.	844.204	68.0786	32.2341
90.	844.204	65.8773	31.6098
100.	844.204	63.598	31.0047

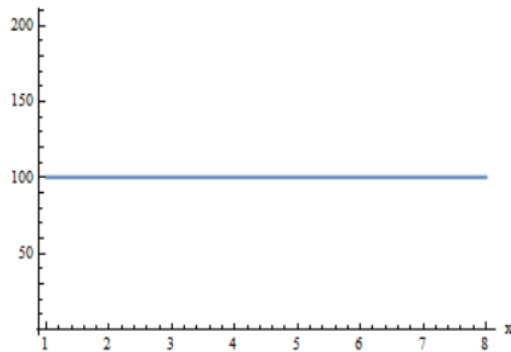
Перевод в систему СИ:

Точка участка li [м]	Массовый расход G [кг/сек]	Удельный массовый расход W	Давление P [Па]	Температура t [K]
0	844.204	548.405	8.20188979×10^6	311.15
10 000.	844.204	548.405	8.02655533×10^6	310.348
20 000.	844.204	548.405	7.8475428×10^6	309.57
40 000.	844.204	548.405	7.47722971×10^6	308.087
60 000.	844.204	548.405	7.08804105×10^6	306.693
80 000.	844.204	548.405	6.67623323×10^6	305.384
90 000.	844.204	548.405	6.46035591×10^6	304.76
100 000.	844.204	548.405	6.23682978×10^6	304.155

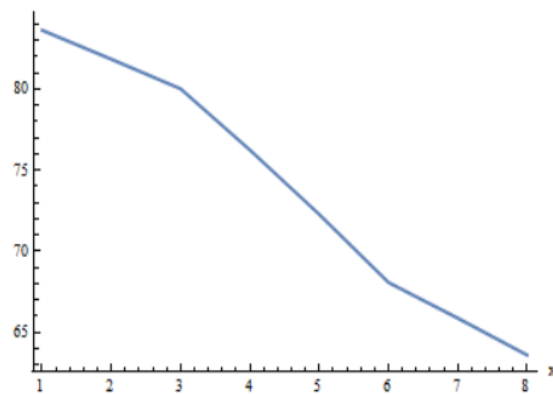
Входные данные для моделирования нестационарного режима:

Точка участка li [м]	Удельный массовый расход W	Давление P [Па]	Температура t [K]
0	548.405	8.20188979×10^6	311.15
10 000.	548.405	8.02655533×10^6	310.348
20 000.	548.405	7.8475428×10^6	309.57
40 000.	548.405	7.47722971×10^6	308.087
60 000.	548.405	7.08804105×10^6	306.693
80 000.	548.405	6.67623323×10^6	305.384
90 000.	548.405	6.46035591×10^6	304.76
100 000.	548.405	6.23682978×10^6	304.155

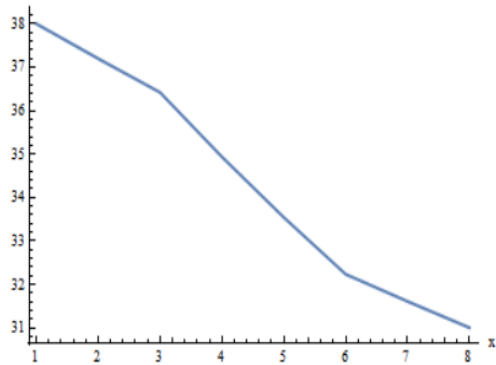
q (млн.куб.м в сутки)



P (атм)



t (°C)



(* -----
Нестационар ----- *)

Значения входных параметров:

Число точек разбиения: $n = 7$;Начало участка: $l_0 = 0$ м;Длина участка: $L = 100\,000$ м;Шаг по иксу: $\Delta x = 20\,000$ м;Шаг по времени: $\tau = 300$ сек;Общее время моделирования: $\text{time} = 43\,200$ сек;Количество временных слоев: $\text{timeLayersNumber} = 144$;Внутренний диаметр участка газопровода: $D = 1.4$ м;Площадь поперечного сечения трубы: $S = 1.53938$ м²;

Удельная теплоемкость газа: $C_p = 2746.54 \frac{\text{Дж}}{\text{кг K}}$;

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

Относительная плотность газа по воздуху: $\Delta = 0.6047$;Универсальная газовая постоянная: $R = 48.3973$;Коэффициент эффективности участка: $E = 0.95$;Коэффициент гидравлического сопротивления: $\lambda = 0.00993229$;Глубина залегания трубы: $h(x) = 1$;Температура грунта $T_{гр} = 285.15$ K;

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

Коэффициент сжимаемости газа: $z = 0.880345$;Коэффициенты: $\alpha = 271.424$; $\beta = 0.962809$; $\gamma = 1.17942$;Точность расчета $\epsilon = 1 \times 10^{-6}$

Граничные условия: $P_0 = 8.20189 \times 10^6$ Па; $T_0 = 311.15$ K; $W_0 = 548.405 \frac{\text{кг}}{\text{сек м}^2}$.

На данном временном слое ($k = 1$) получим:Количество итераций s : 4

В системе единиц стационарного режима

101.703774	83.636	38.
101.541572	81.8520609	37.2073889
101.667195	80.0115657	36.4215448
101.471939	76.2490365	34.9436756
101.620606	72.2978716	33.5629529
101.100065	68.1256498	32.2661218
100.900444	65.9840359	31.6838989
100.1	63.7685231	31.1343773

$$\begin{pmatrix} 557.191 & 8.20189 \times 10^6 & 311.15 \\ 556.303 & 8.02695 \times 10^6 & 310.357 \\ 556.991 & 7.84645 \times 10^6 & 309.572 \\ 555.921 & 7.47748 \times 10^6 & 308.094 \\ 556.736 & 7.09 \times 10^6 & 306.713 \\ 553.884 & 6.68084 \times 10^6 & 305.416 \\ 552.79 & 6.47082 \times 10^6 & 304.834 \\ 548.405 & 6.25356 \times 10^6 & 304.284 \end{pmatrix}$$

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

Количество итераций s : 3

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 101.735264 & 83.636 & 38. \\ 101.622942 & 81.8538376 & 37.2143829 \\ 101.718914 & 80.0108053 & 36.4294743 \\ 101.356072 & 76.2639609 & 34.9579743 \\ 101.442226 & 72.3271916 & 33.5872003 \\ 100.81007 & 68.1845549 & 32.3045441 \\ 100.555028 & 66.0598341 & 31.7270563 \\ 100.1 & 63.8654994 & 31.1938234 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 557.364 & 8.20189 \times 10^6 & 311.15 \\ 556.749 & 8.02712 \times 10^6 & 310.364 \\ 557.274 & 7.84638 \times 10^6 & 309.579 \\ 555.287 & 7.47894 \times 10^6 & 308.108 \\ 555.759 & 7.09287 \times 10^6 & 306.737 \\ 552.295 & 6.68662 \times 10^6 & 305.455 \\ 550.898 & 6.47826 \times 10^6 & 304.877 \\ 548.405 & 6.26307 \times 10^6 & 304.344 \end{pmatrix}$$

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

Количество итераций s : 3

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 101.649566 & 83.636 & 38. \\ 101.555326 & 81.8570411 & 37.2204382 \\ 101.620088 & 80.01627 & 36.4400665 \\ 101.209799 & 76.2842275 & 34.9746475 \\ 101.244378 & 72.3567924 & 33.6093479 \\ 100.658607 & 68.2392048 & 32.3393384 \\ 100.421853 & 66.1194697 & 31.7564748 \\ 100.1 & 63.9341006 & 31.2270653 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 556.894 & 8.20189 \times 10^6 & 311.15 \\ 556.378 & 8.02743 \times 10^6 & 310.37 \\ 556.733 & 7.84692 \times 10^6 & 309.59 \\ 554.485 & 7.48093 \times 10^6 & 308.125 \\ 554.675 & 7.09578 \times 10^6 & 306.759 \\ 551.465 & 6.69198 \times 10^6 & 305.489 \\ 550.168 & 6.4841 \times 10^6 & 304.906 \\ 548.405 & 6.26979 \times 10^6 & 304.377 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 4$) получим:

Количество итераций s : 3

В системе единиц стационарного режима

$$\begin{pmatrix} 101.531389 & 83.636 & 38. \\ 101.447288 & 81.8612286 & 37.225203 \\ 101.492856 & 80.0242621 & 36.4504524 \\ 101.089406 & 76.3059125 & 34.9911633 \\ 101.090874 & 72.3846122 & 33.6283554 \\ 100.571411 & 68.2875141 & 32.3696329 \\ 100.362574 & 66.1698003 & 31.7793025 \\ 100.1 & 63.9900709 & 31.249416 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 556.247 & 8.20189 \times 10^6 & 311.15 \\ 555.786 & 8.02784 \times 10^6 & 310.375 \\ 556.036 & 7.8477 \times 10^6 & 309.6 \\ 553.826 & 7.48305 \times 10^6 & 308.141 \\ 553.834 & 7.09851 \times 10^6 & 306.778 \\ 550.988 & 6.69672 \times 10^6 & 305.52 \\ 549.844 & 6.48904 \times 10^6 & 304.929 \\ 548.405 & 6.27528 \times 10^6 & 304.399 \end{pmatrix}$$

На данном временном слое ($k = 39$) получим: На данном временном слое ($k = 40$) получим:

Количество итераций $s: 2$

Количество итераций $s: 1$

В системе единиц стационарного режима

В системе единиц стационарного режима

100.13019	83.636	38.
100.129491	81.9096176	37.223196
100.129032	80.1192303	36.4443294
100.12384	76.5215991	35.0273714
100.11945	72.6439332	33.6291869
100.109809	68.6831274	32.3726819
100.105356	66.5774518	31.7500857
100.1	64.4335697	31.1732

100.12691	83.636	38.
100.126339	81.9097299	37.2229121
100.125876	80.1194584	36.4446733
100.121417	76.5220567	35.0254188
100.117394	72.6446123	33.6281166
100.108773	68.6840047	32.3720717
100.104777	66.5783883	31.747713
100.1	64.4345877	31.1688992

548.57	8.20189×10^6	311.15
548.567	8.03259×10^6	310.373
548.564	7.85701×10^6	309.594
548.536	7.50421×10^6	308.177
548.512	7.12394×10^6	306.779
548.459	6.73551×10^6	305.523
548.434	6.52902×10^6	304.9
548.405	6.31877×10^6	304.323

548.552	8.20189×10^6	311.15
548.549	8.0326×10^6	310.373
548.547	7.85703×10^6	309.595
548.522	7.50425×10^6	308.175
548.5	7.124×10^6	306.778
548.453	6.7356×10^6	305.522
548.431	6.52911×10^6	304.898
548.405	6.31887×10^6	304.319

На данном временном слое ($k = 43$) получим: На данном временном слое ($k = 44$) получим:

Количество итераций $s: 1$

Количество итераций $s: 5$

В системе единиц стационарного режима

В системе единиц стационарного режима

100.119049	83.636	38.
100.118762	81.9099991	37.2217526
100.118317	80.120012	36.4454011
100.11553	76.5231347	35.0202323
100.112465	72.646269	33.6239137
100.106318	68.6861333	32.3712499
100.103402	66.5806525	31.7435829
100.1	64.4370319	31.159753

100.417808	83.636	38.
100.483159	81.8990517	37.2171062
100.518547	80.0924677	36.4304741
101.13933	76.4672614	34.99052
101.554293	72.4513821	33.4924055
104.769673	68.3696176	32.1875722
106.18629	65.9697136	31.3487137
110.5	63.519747	30.512022

548.509	8.20189×10^6	311.15
548.508	8.03263×10^6	310.372
548.505	7.85709×10^6	309.595
548.49	7.50436×10^6	308.17
548.473	7.12417×10^6	306.774
548.44	6.73581×10^6	305.521
548.424	6.52933×10^6	304.894
548.405	6.31911×10^6	304.31

550.146	8.20189×10^6	311.15
550.504	8.03155×10^6	310.367
550.698	7.85439×10^6	309.58
554.099	7.49888×10^6	308.141
556.372	7.10505×10^6	306.642
573.988	6.70477×10^6	305.338
581.749	6.46942×10^6	304.499
605.382	6.22916×10^6	303.662

На данном временном слое ($k = 45$) получим: На данном временном слое ($k = 46$) получим:

Количество итераций s : 5

В системе единиц стационарного режима

101.001794	83.636	38.
101.126408	81.8781956	37.2108707
101.19372	80.0449709	36.4082985
102.239123	76.3706504	34.9441795
102.984903	72.2267754	33.3560581
106.424945	68.0206898	31.9955153
108.014318	65.5355685	31.1265633
110.5	62.9916776	30.2269625

553.346	8.20189×10^6	311.15
554.028	8.02951×10^6	310.361
554.397	7.84973×10^6	309.558
560.124	7.4894×10^6	308.094
564.21	7.08303×10^6	306.506
583.057	6.67055×10^6	305.146
591.764	6.42684×10^6	304.277
605.382	6.17737×10^6	303.377

Количество итераций s : 4

В системе единиц стационарного режима

101.737442	83.636	38.
101.892804	81.8521848	37.2064303
101.976807	79.9887246	36.3872955
103.197725	76.2557813	34.8954628
104.106837	72.013239	33.2423835
107.178716	67.7034308	31.8327098
108.639012	65.1819045	30.9748398
110.5	62.5965344	30.0631546

557.376	8.20189×10^6	311.15
558.227	8.02696×10^6	310.356
558.687	7.84421×10^6	309.537
565.376	7.47814×10^6	308.045
570.357	7.06209×10^6	306.392
587.186	6.63944×10^6	304.983
595.187	6.39216×10^6	304.125
605.382	6.13862×10^6	303.213

На данном временном слое ($k = 143$) получим: На данном временном слое ($k = 144$) получим:

Количество итераций s : 1

В системе единиц стационарного режима

110.499415	83.636	38.
110.499404	81.5332684	37.28836
110.499435	79.3317937	36.5847911
110.499447	74.8962841	35.2722419
110.499564	70.0201655	33.9789393
110.49979	64.9767388	32.8100039
110.499896	62.2436515	32.2292844
110.5	59.4276294	31.6788392

605.379	8.20189×10^6	311.15
605.379	7.99568×10^6	310.438
605.379	7.77979×10^6	309.735
605.379	7.34482×10^6	308.422
605.38	6.86663×10^6	307.129
605.381	6.37204×10^6	305.96
605.382	6.10402×10^6	305.379
605.382	5.82786×10^6	304.829

Количество итераций s : 1

В системе единиц стационарного режима

110.499466	83.636	38.
110.499456	81.5332665	37.2883858
110.499484	79.3317893	36.5847756
110.499496	74.8962781	35.2723386
110.499595	70.0201492	33.9791891
110.499799	64.9767169	32.8099281
110.499902	62.24363	32.2290966
110.5	59.4276084	31.678723

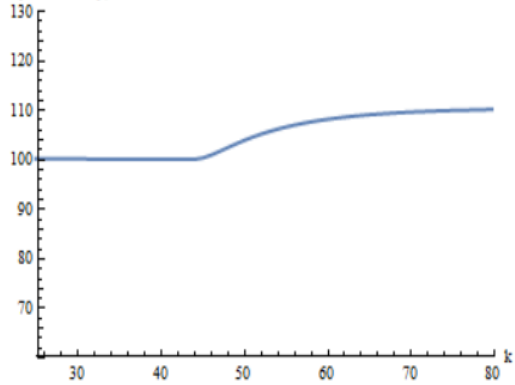
605.379	8.20189×10^6	311.15
605.379	7.99568×10^6	310.438
605.379	7.77979×10^6	309.735
605.379	7.34482×10^6	308.422
605.38	6.86663×10^6	307.129
605.381	6.37204×10^6	305.96
605.382	6.10401×10^6	305.379
605.382	5.82786×10^6	304.829

Максимальная погрешность равна 10.4

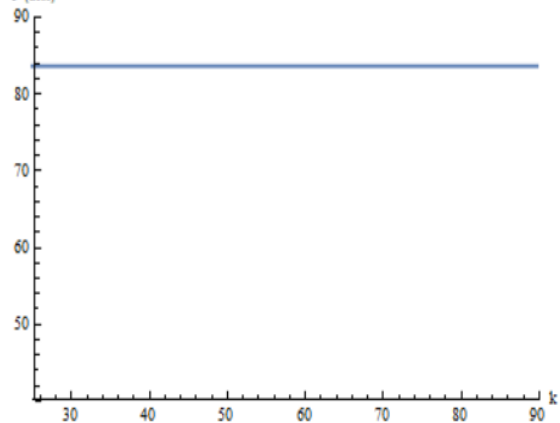
(*----- Графики ----- *)

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

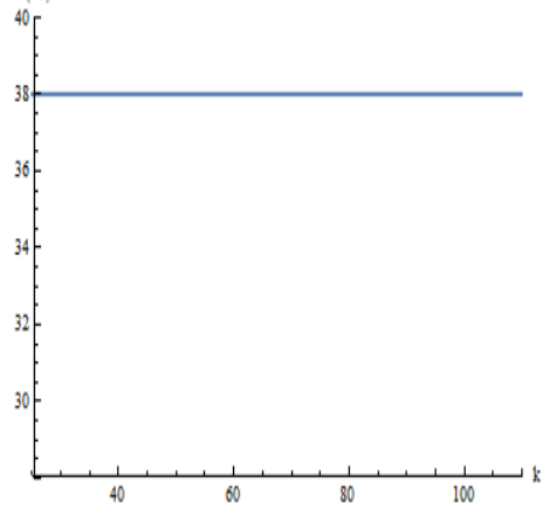
q (млн.куб.м на добу)



P (атм)

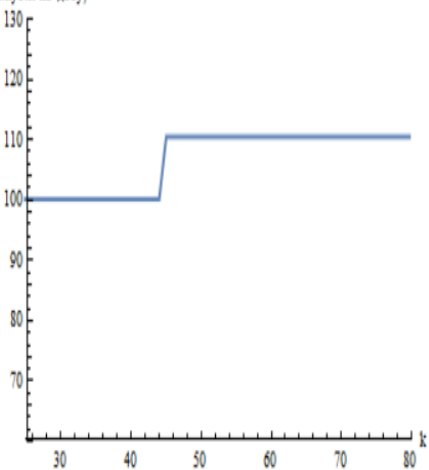


t (°C)

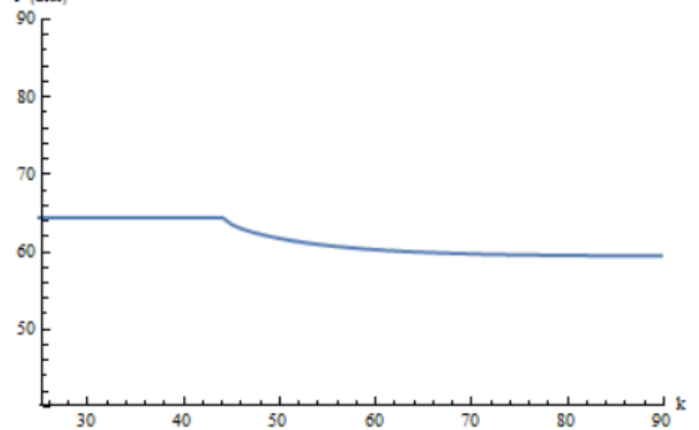


(*----- Результаты в 7 точке разбиения -----)

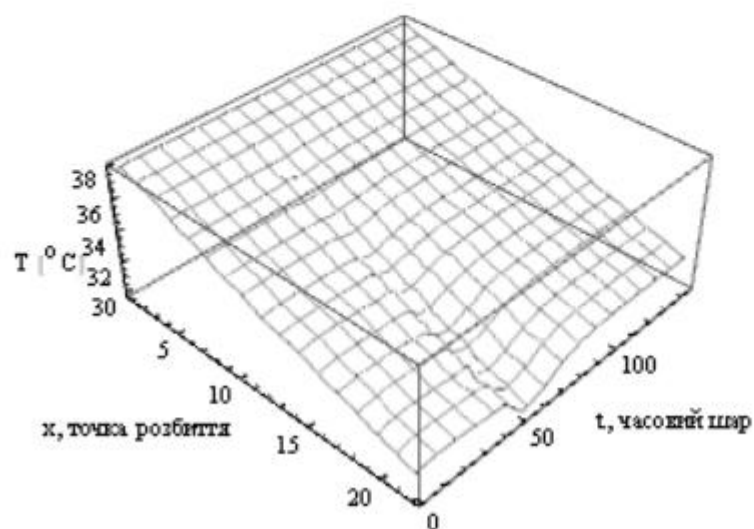
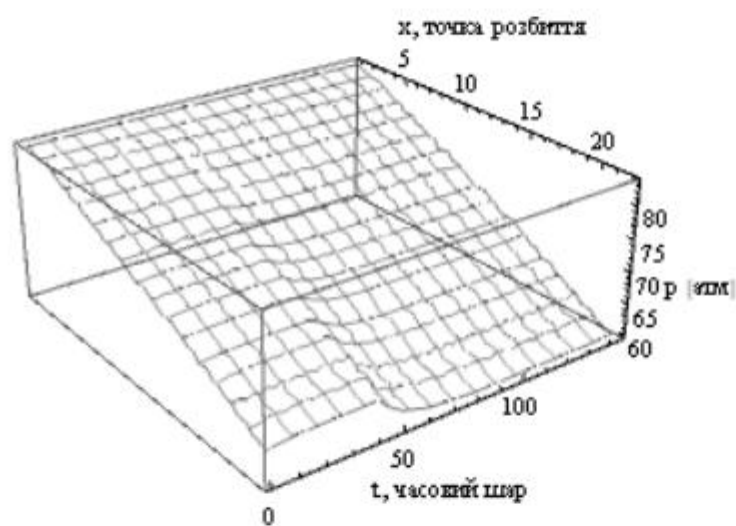
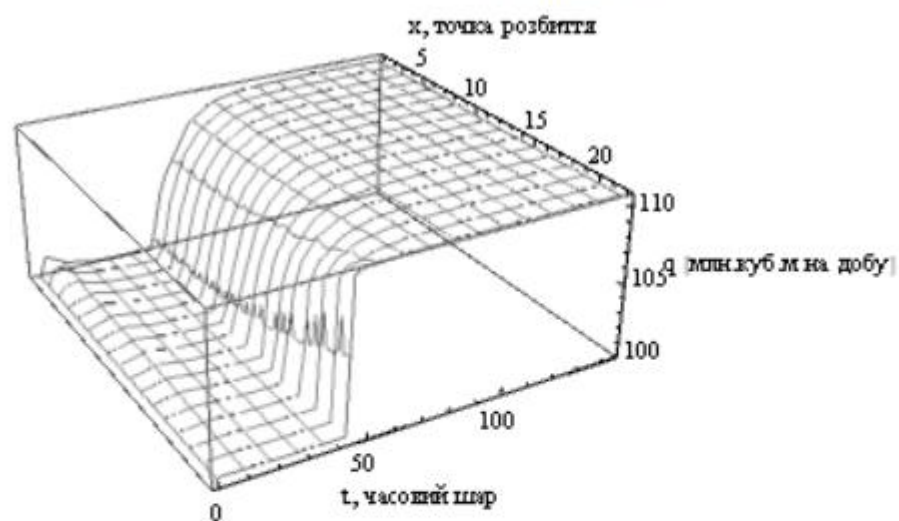
q (млн.куб.м на добу)



P (атм)



(* ----- Графики 3D ----- *)



ДОДАТОК Б

Код програми розрахунку ННРТГ по ДТ з використанням звичайного методу Ньютона

```
Print["(*----- Сравнение -----*)"];
|печатать
Print[
|печатать
    "Сравним результаты, полученные на последнем слое, со стационарным режимом (в
    системе единиц стационарного режима)";
Print["Стационарный режим:"];
|печатать
Print[NumberForm[tempoMasStat // MatrixForm, 9]];
|числовая форма |матричная форма
Print["На последнем ", k - 1, "-м временном слое получим:"];
|печатать
Print[NumberForm[tempoMas // MatrixForm, 9]];
|числовая форма |матричная форма
Print["Максимальная погрешность равна ", Max[Abs[tempoMas - tempoMasStat]]];
|м... |абсолютное значение

Print["(*----- Графики -----*)"];
|печатать
For[j = 1, j ≤ n + 1, j++,
|цикл для
{
    qPlotMas = {};
    PplotMas = {};
    TplotMas = {};
    Do[{AppendTo[qPlotMas, grafSiList[[i, j, 1]]], AppendTo[PplotMas, grafSiList[[i, j, 2]]],
|добавить в конец к |добавить в конец к
        AppendTo[TplotMas, grafSiList[[i, j, 3]]], {i, 1, timelayersNumber}}];
|добавить в конец к
    Print["(*----- Результаты в ", j - 1,
|печатать
        " точке разбиения -----*)"];
    Print[ListLinePlot[qPlotMas, PlotRange → {{25, 80}, {60, 130}},
|линейный график данных |отображаемый диапазон графика
        AxesLabel → {"k", "q [млн.куб.м на добу]"}, PlotStyle → Thick];
|стиль графика |жирный
    Print[ListLinePlot[PplotMas, PlotRange → {{25, 90}, {40, 90}}, AxesLabel → {"k", "P [атм]"},
|линейный график данных |отображаемый диапазон графика |обозначения на осях
        PlotStyle → Thick];
|жирный
    Print[ListLinePlot[TplotMas, PlotRange → {{25, 110}, {28, 40}}, AxesLabel → {"k", "t [°C]"},
|линейный график данных |отображаемый диапазон графика |обозначения на осях
        PlotStyle → Thick];
|жирный
}];

Print["(*----- Графики 3D-----*)"];
|печатать
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 1]], {x, 1, n}, {t, 1, timelayersNumber},
|округлить |округлить
    AxesLabel → {"x, точка розбиття", "t, часовий шар", "q [млн.куб.м на добу]"},
|обозначения на осях
    PlotStyle → {Transparent}}
|прозрачный
Plot3D[grafSiList[[Round[t], Round[x], 2]], {x, 1, n}, {t, 1, timelayersNumber},
|округлить |округлить
```

```

AxesLabel → {"x, точка разбиття", "t, часовий шар", "p [атм]"},
|обозначения на осях
PlotStyle → {Transparent}}
|прозрачный
Plot3D[grafSilist[Round[t], Round[x], 3]], {x, 1, n}, {t, 1, timeLayersNumber},
|округлить |округлить
AxesLabel → {"x, точка разбиття", "t, часовий шар", "T [°C]"},
|обозначения на осях
PlotStyle → {Transparent}}
|прозрачный

Export[StringJoin["Кинетическая модель – нестационар.txt"], grafSilist];
|экспортировать |соединить строки

totalWorkTime = SessionTime[] - startWorkTime;
|время сеанса работы

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

(*-----
Стационар -----*)

Значения входных параметров:
Число точек разбиения: n = 7;
Количество рассматриваемых параметров: m = 3;
Начало участка: l0 = 0 км;
Длина участка: L = 100 км;
Шаг по иксу: Δx = 20. км;
Внутренний диаметр участка газопровода: D = 1400. мм;
Площадь поперечного сечения трубы: S = 1.53938 м2;
Давление газа в начале участка: Pn = 83.636 атм.;
Температура газа в начале участка: tn = 38 °C;
Коммерческий расход: q = 100.1 млн. м3 в сутки;
|ккал
Удельная теплоемкость газа: Cp = 0.656 —;
|кГК
Толщина стенок трубы: δ = 10 мм;
Относительная плотность газа по воздуху: Δ = 0.6047;
Коэффициент эффективности участка: E = 0.95;
Температура грунта: tгр = 12. °C;

Коэффициент теплопередачи от трубы к грунту: K = 1.4 ккал————;
|SuperscriptBox[m, 3] чК

Коэффициент сжимаемости газа в начале участка: zn = 0.88;
Поправочный коэффициент, учитывающий
отклонение режима течения газа от квадратичного: α = 1;
Коэффициент, учитывающий влияние подкладных колец: φ = 1;

```

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

Обозначения:

T_l – температура газа в точке участка с координатой l , находящейся на расстоянии l от начала участка газопровода [K]
 t_l – 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 [K]
 P_l – 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_{lPrev} – промежуточная переменная, равная значению P_l

Стационарный режим:

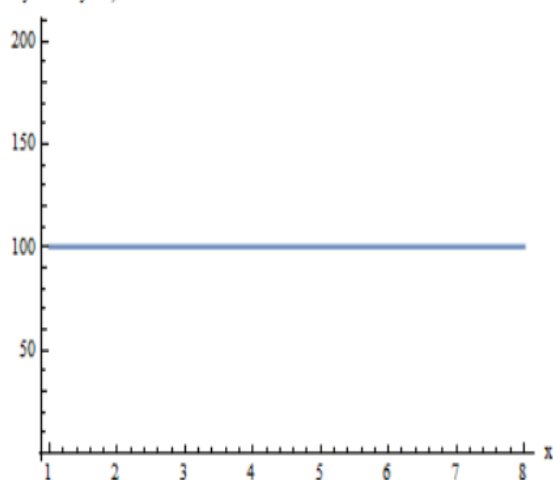
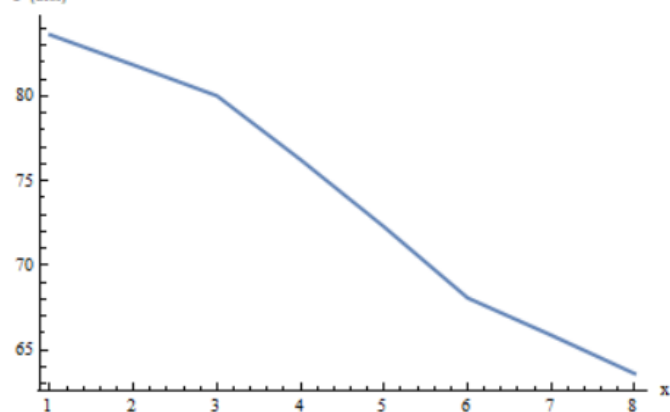
Точка участка l_i [км]	Массовый расход G [кг/сек]	Давление P [атм]	Температура t [°C]
0	844.204	83.636	38
10.	844.204	81.8481	37.1978
20.	844.204	80.0227	36.4203
40.	844.204	76.2465	34.9366
60.	844.204	72.2779	33.543
80.	844.204	68.0786	32.2341
90.	844.204	65.8773	31.6098
100.	844.204	63.598	31.0047

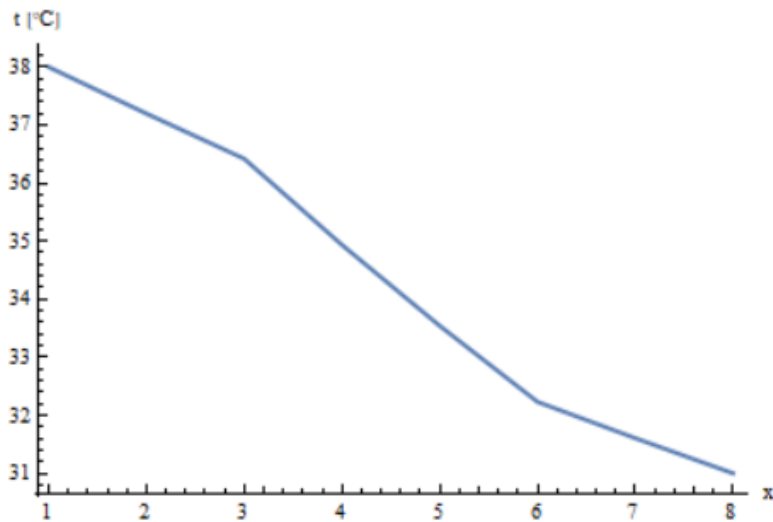
Перевод в систему СИ:

Точка участка l_i [м]	Массовый расход G [кг/сек]	Удельный массовый расход W	Давление P [Па]	Температура t [K]
0	844.204	548.405	8.20188979×10^6	311.15
10 000.	844.204	548.405	8.02655533×10^6	310.348
20 000.	844.204	548.405	7.8475428×10^6	309.57
40 000.	844.204	548.405	7.47722971×10^6	308.087
60 000.	844.204	548.405	7.08804105×10^6	306.693
80 000.	844.204	548.405	6.67623323×10^6	305.384
90 000.	844.204	548.405	6.46035591×10^6	304.76
100 000.	844.204	548.405	6.23682978×10^6	304.155

Входные данные для моделирования нестационарного режима:

Точка участка l_i [м]	Удельный массовый расход W	Давление P [Па]	Температура t [K]
0	548.405	8.20188979×10^6	311.15
10 000.	548.405	8.02655533×10^6	310.348
20 000.	548.405	7.8475428×10^6	309.57
40 000.	548.405	7.47722971×10^6	308.087
60 000.	548.405	7.08804105×10^6	306.693
80 000.	548.405	6.67623323×10^6	305.384
90 000.	548.405	6.46035591×10^6	304.76
100 000.	548.405	6.23682978×10^6	304.155

 q (млн.куб.м в сутки) P (атм)



(*-----

Нестационар ----- *)

Значения входных параметров:

Число точек разбиения: $n = 7$;

Начало участка: $l_0 = 0$ м;

Длина участка: $L = 100000$ м;

Шаг по иксу: $\Delta x = 20000$ 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: $C_p = 2746.54 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}$;

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

Относительная плотность газа по воздуху: $\Delta = 0.6047$;

Универсальная газовая постоянная: $R = 48.3973$;

Коэффициент эффективности участка: $E = 0.95$;

Коэффициент гидравлического сопротивления: $\lambda = 0.00993229$;

Глубина залегания трубы: $h(x) = 1$;

Температура грунта $T_{gp} = 285.15$ K;

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

Коэффициент сжимаемости газа: $z = 0.880345$;

Коэффициенты: $\alpha = 271.424$;

$\beta = 0.962809$;

$\gamma = 1.17942$;

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

Граничные условия: $P_0 = 8.20189 \times 10^6$ Па; $T_0 = 311.15$ K; $W_n = 548.405 \frac{\text{кг}}{\text{сек м}^2}$.

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

Количество итераций s : 4

В системе единиц стационарного режима

101.703774	83.636	38.
101.541572	81.8520609	37.2073889
101.667195	80.0115657	36.4215448
101.471939	76.2490365	34.9436756
101.620606	72.2978716	33.5629529
101.100065	68.1256498	32.2661218
100.900444	65.9840359	31.6838989
100.1	63.7685231	31.1343773

557.191	8.20189×10^6	311.15
556.303	8.02695×10^6	310.357
556.991	7.84645×10^6	309.572
555.921	7.47748×10^6	308.094
556.736	7.09×10^6	306.713
553.884	6.68084×10^6	305.416
552.79	6.47082×10^6	304.834
548.405	6.25356×10^6	304.284

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

Количество итераций s : 3

В системе единиц стационарного режима

101.735264	83.636	38.
101.622942	81.8538376	37.2143829
101.718914	80.0108053	36.4294743
101.356072	76.2639609	34.9579743
101.442226	72.3271916	33.5872003
100.81007	68.1845549	32.3045441
100.555028	66.0598341	31.7270563
100.1	63.8654994	31.1938234

557.364	8.20189×10^6	311.15
556.749	8.02712×10^6	310.364
557.274	7.84638×10^6	309.579
555.287	7.47894×10^6	308.108
555.759	7.09287×10^6	306.737
552.295	6.68662×10^6	305.455
550.898	6.47826×10^6	304.877
548.405	6.26307×10^6	304.344

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

Количество итераций s : 3

В системе единиц стационарного режима

101.649566	83.636	38.
101.555326	81.8570411	37.2204382
101.620088	80.01627	36.4400665
101.209799	76.2842275	34.9746475
101.244378	72.3567924	33.6093479
100.658607	68.2392048	32.3393384
100.421853	66.1194697	31.7564748
100.1	63.9341006	31.2270653

556.894	8.20189×10^6	311.15
556.378	8.02743×10^6	310.37
556.733	7.84692×10^6	309.59
554.485	7.48093×10^6	308.125
554.675	7.09578×10^6	306.759
551.465	6.69198×10^6	305.489
550.168	6.4841×10^6	304.906
548.405	6.26979×10^6	304.377

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

Количество итераций s : 1

В системе единиц стационарного режима

100.119049	83.636	38.
100.118762	81.9099991	37.2217526
100.118317	80.120012	36.4454011
100.11553	76.5231347	35.0202323
100.112465	72.646269	33.6239137
100.106318	68.6861333	32.3712499
100.103402	66.5806525	31.7435829
100.1	64.4370319	31.159753
548.509	8.20189×10^6	311.15
548.508	8.03263×10^6	310.372
548.505	7.85709×10^6	309.595
548.49	7.50436×10^6	308.17
548.473	7.12417×10^6	306.774
548.44	6.73581×10^6	305.521
548.424	6.52933×10^6	304.894
548.405	6.31911×10^6	304.31

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

Количество итераций s : 5

В системе единиц стационарного режима

99.8282266	83.636	38.
99.7681134	81.9206131	37.2253546
99.7305566	80.1464183	36.4597775
99.1500126	76.5776515	35.0466426
98.7201422	72.8290587	33.7425414
95.7477925	68.9875466	32.5508776
94.3788789	67.1415453	32.1103422
90.5	65.2652037	31.7457114
546.916	8.20189×10^6	311.15
546.587	8.03367×10^6	310.375
546.381	7.85968×10^6	309.61
543.2	7.5097×10^6	308.197
540.845	7.14209×10^6	306.893
524.561	6.76537×10^6	305.701
517.061	6.58434×10^6	305.26
495.811	6.40033×10^6	304.896

На данном временном слое ($k = 45$) получим:

Количество итераций s : 5

В системе единиц стационарного режима

99.254	83.636	38.
99.1403481	81.9408881	37.2306411
99.0674336	80.1921527	36.4811672
98.0935193	76.6719567	35.0906289
97.3198311	73.0394124	33.8653882
94.1798233	69.3151055	32.7360266
92.671012	67.5351232	32.3216052
90.5	65.7291263	32.0049064
543.77	8.20189×10^6	311.15
543.147	8.03566×10^6	310.381
542.748	7.86416×10^6	309.631
537.412	7.51895×10^6	308.241
533.174	7.16272×10^6	307.015
515.971	6.79749×10^6	305.886
507.705	6.62293×10^6	305.472
495.811	6.44583×10^6	305.155

На данном временном слое ($k = 46$) получим:

Количество итераций s : 4

В системе единиц стационарного режима

98.5209591	83.636	38.
98.3805593	81.9661863	37.2343683
98.2881735	80.2463488	36.5015124
97.1580921	76.7834131	35.137839
96.2230513	73.2381859	33.9672039
93.4610742	69.6065434	32.887652
92.111712	67.8519777	32.4671017
90.5	66.0737063	32.1591102
539.754	8.20189×10^6	311.15
538.985	8.03814×10^6	310.384
538.479	7.86948×10^6	309.652
532.288	7.52988×10^6	308.288
527.165	7.18221×10^6	307.117
512.033	6.82607×10^6	306.038
504.641	6.65401×10^6	305.617
495.811	6.47962×10^6	305.309

На данном временном слое ($k = 143$) получим: На данном временном слое ($k = 144$) получим:

Количество итераций $s: 1$

Количество итераций $s: 1$

В системе единиц стационарного режима

В системе единиц стационарного режима

90.4999057	83.636	38.
90.5000025	82.225871	37.135152
90.4999147	80.7753005	36.28417
90.5002462	77.8651999	34.7137005
90.50006	74.780292	33.1812997
90.5001812	71.6537109	31.8320831
90.500073	70.0149903	31.1591902
90.5	68.3582245	30.5255921

90.4999356	83.636	38.
90.5000198	82.2258701	37.1349665
90.499944	80.7753011	36.2840114
90.5002308	77.8651933	34.7136839
90.5000652	74.7802945	33.1804419
90.5001845	71.6537212	31.8306888
90.5000818	70.0150099	31.1585697
90.5	68.3582419	30.5256307

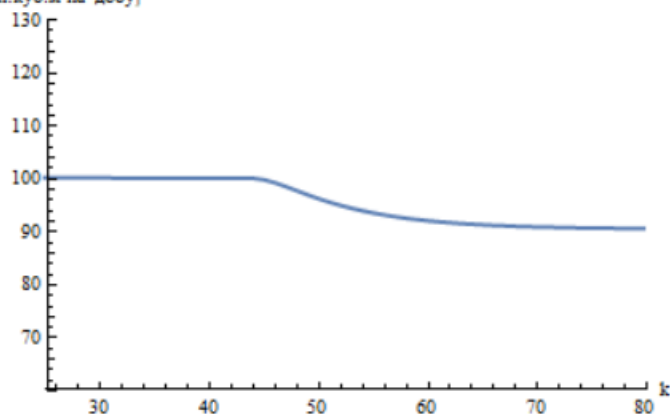
495.81	8.20189×10^6	311.15
495.811	8.0636×10^6	310.285
495.81	7.92135×10^6	309.434
495.812	7.63597×10^6	307.864
495.811	7.33344×10^6	306.331
495.812	7.02683×10^6	304.982
495.811	6.86613×10^6	304.309
495.811	6.70365×10^6	303.676

495.81	8.20189×10^6	311.15
495.811	8.0636×10^6	310.285
495.81	7.92135×10^6	309.434
495.812	7.63597×10^6	307.864
495.811	7.33344×10^6	306.33
495.812	7.02683×10^6	304.981
495.811	6.86613×10^6	304.309
495.811	6.70365×10^6	303.676

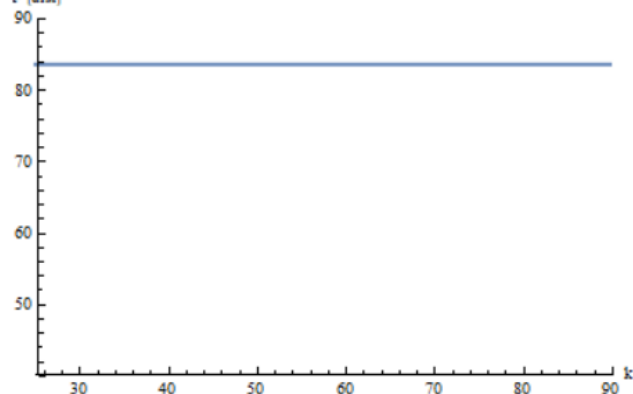
(* ----- Графики -----)

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

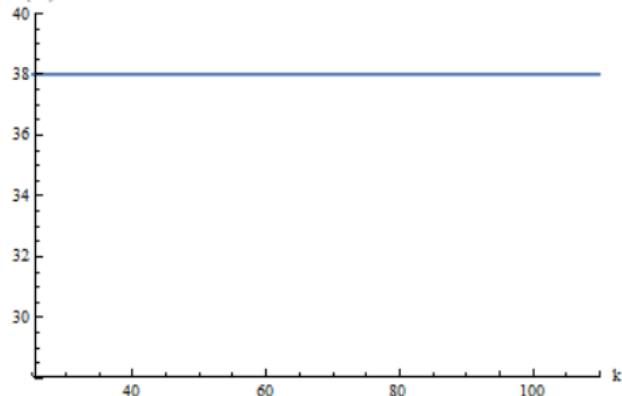
q (млн.куб.м на добу)



P (атм)

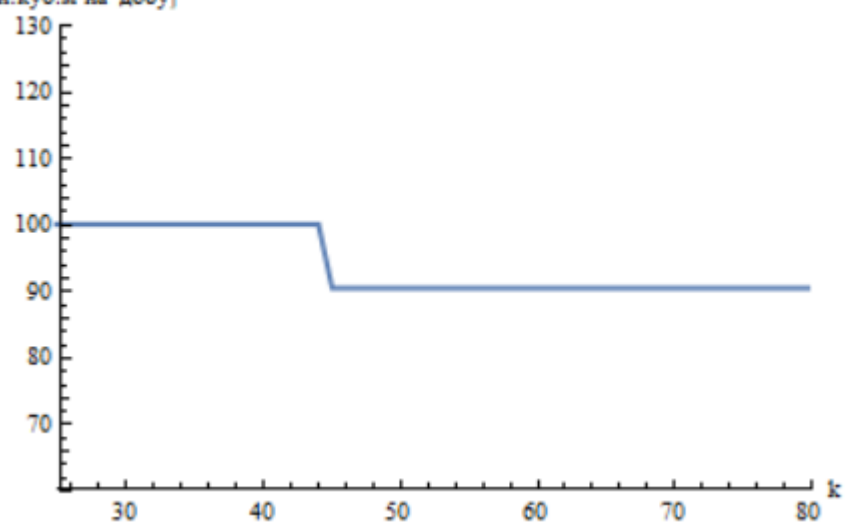


t ($^{\circ}\text{C}$)

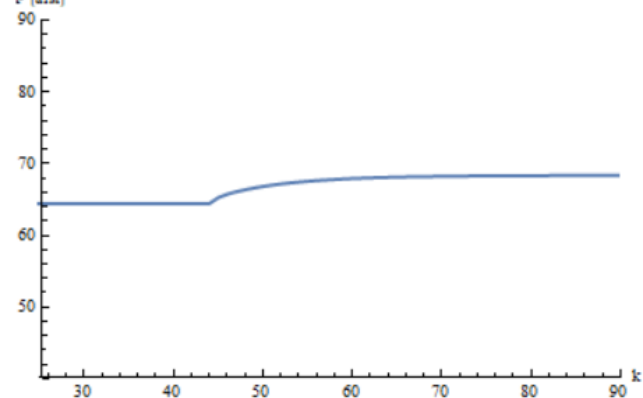


(* ----- Результаты в 7 точке разбиения

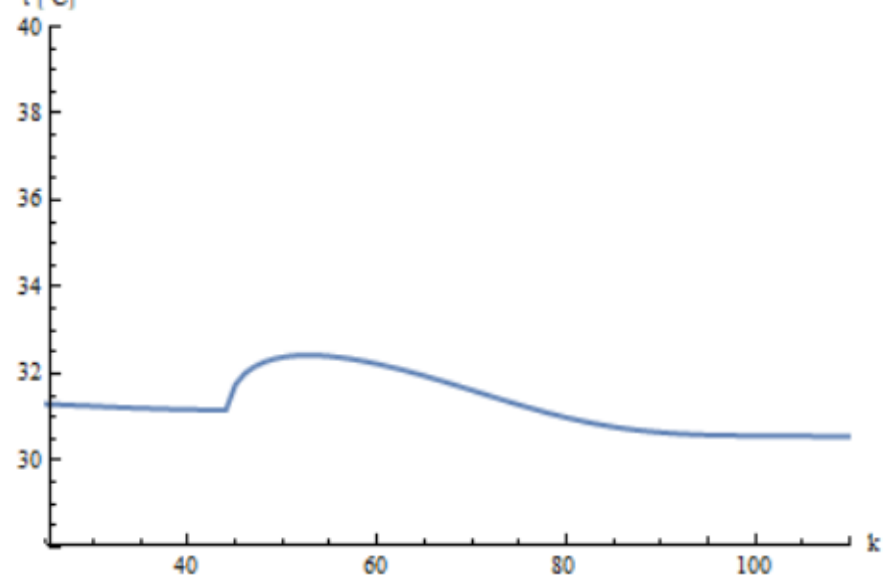
q [млн.куб.м на добу]



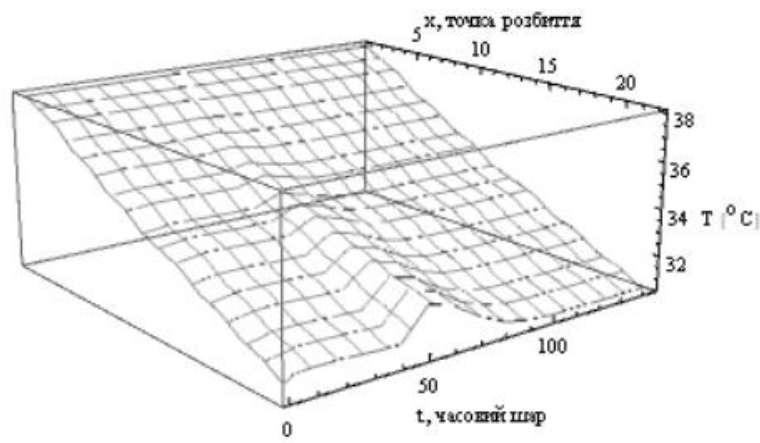
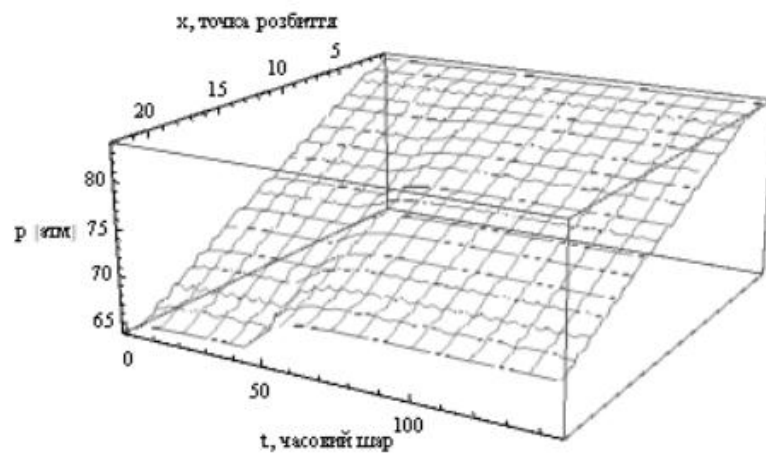
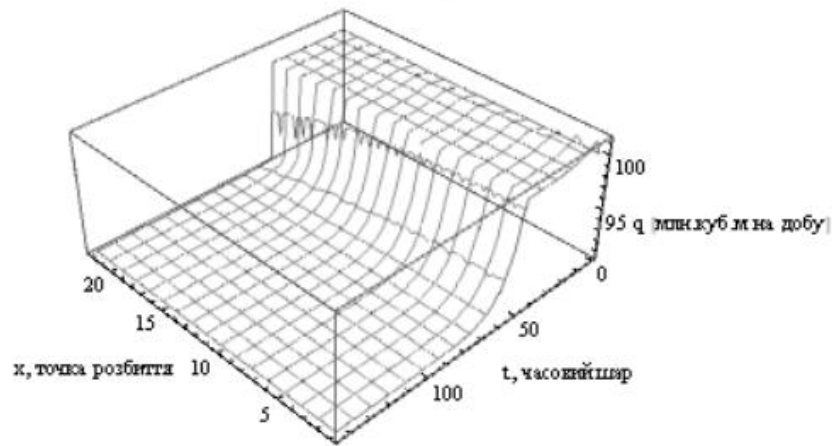
P (атм)



t [$^{\circ}\text{C}$]



(* ----- Графики 3D -----)



ВІДОМІСТЬ АТЕСТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Позначення	Найменування	Дод. відомості
	Текстові документи	
1	Пояснювальна записка	118 с.
2	Презентаційний матеріал	35 с.
	Інші документи	
3	Роздруківки програм	20 с.
4	Рецензія	2 с.
5	Відгук керівника	1 с.

					Застосування нерівномірної сітки та спрощеного методу Ньютона при комп'ютерному моделюванні нестационарних режимів по ділянці трубопроводу			
Змін	Арк.	Номер докум.	Підп.	Дата				
Розроб.	Ревгук Р.В.				(Тема роботи) Відомість атестаційної роботи		Аркуш	Аркушів
Перевір.	Гусарова І.Г.							
Н. контр.	Сидоров М.В.					ХНУРЕ Кафедра ПМ		
Затв.	Гевяшев А.Д.							