

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
Факультет “Энергомашиностроение”
Кафедра Э5 “Вакуумная и компрессорная техника”

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 3
по курсу “Пневмосистемы и их элементы”

«Расчёт пневматической системы. Этап III»

Вариант 10-3

Студент: Вульф М.Д.
Группа: Э5-81

Преподаватель: Чернышёв А.В.

Москва
2018/2019 учебный год

Введение

В выполненном домашнем задании требовалось рассчитать пневматическую систему, состоящую из четырех последовательно-соединённых шар-баллонов заданного объёма.

На первом этапе производился расчет при отсутствии теплообмена между рабочим телом и корпусными элементами системы и при условии, что во всех шар-баллонах находится воздух. На втором этапе производился расчет с учетом теплообмена между рабочим телом и корпусными элементами системы и при условии, что во всех шар-баллонах находится воздух.

На третьем этапе, приведённом в данном отчёте, исследуются процессы, протекающие в трех емкостях исходной расчетной схемы, а расход газа рассчитывается только через два условных сопротивления. Емкости, входящие в состав системы, в начальный момент времени заполнены разными газами, подчиняющимися законам идеального газа, а в емкости, куда они натекают, образуется смесь идеальных газов.

В начальный момент времени клапаны закрыты. Температура газов в шар-баллонах равна температуре окружающей среды. После открытия клапанов начинается выравнивание давления во всех трёх емкостях.

Требуется построить зависимости изменения расходов, давления и температуры газов в шар-баллонах от времени, а также график изменения массовой концентрации в камере смешения. Расчет окончить при условии, что разница между максимальным и минимальным давлением в шар-баллонах не будет превышать 5%.

Техническое задание

Требуется произвести расчет процессов наполнения и опорожнения емкостей условной пневматической системы (ПС). Расчётные схемы пневматических систем представляют набор емкостей постоянного объема, соединенных между собой. На рис. 1 приведена расчётная схема рассматриваемого варианта задания (согласно схеме № 10). В таблице 1 содержатся исходные данные для расчёта (согласно варианту №3). Дополнительные условия приведены ниже.

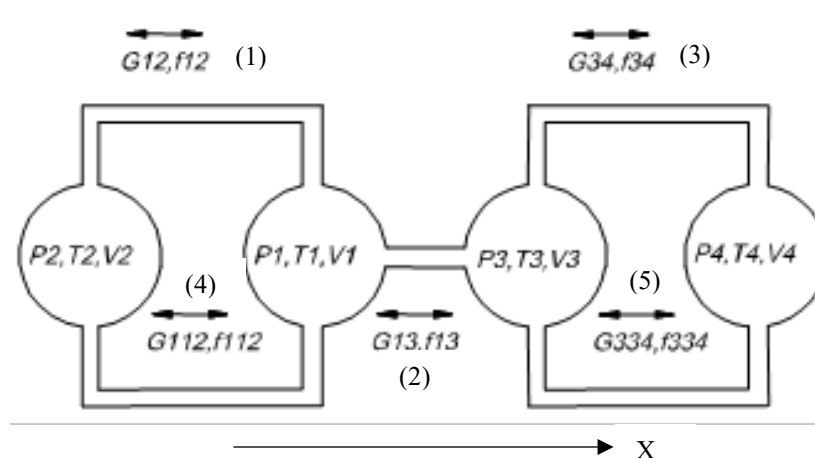


Рис. 1. Расчётная схема №10

Таблица 1. Исходные данные

$P_1 \times 10^{-5}$, Па	2	μ_{12}	0,75	$V_1 \times 10^3$, м ³	4
$P_2 \times 10^{-5}$, Па	5	μ_{13}	0,75	$V_2 \times 10^3$, м ³	5
$P_3 \times 10^{-5}$, Па	8	μ_{34}	0,8	$V_3 \times 10^3$, м ³	3
$P_4 \times 10^{-5}$, Па	12	μ_{112}	0,9	$V_4 \times 10^3$, м ³	6
$d_{12} \times 10^3$, м	0,5	μ_{334}	0,9		
$d_{13} \times 10^3$, м	0,8	T_1 , К	300		
$d_{34} \times 10^3$, м	0,9	T_2 , К	300		
$d_{112} \times 10^3$, м	0,7	T_3 , К	300		
$d_{334} \times 10^3$, м	0,6	T_4 , К	300		

Схема 10:

$f_{112}=0$, $f_{34}=0$ и $f_{334}=0$, $V_4=0$ (каналы d_{112} , d_{34} и d_{334} перекрыты и расход отсутствует);

емкость 2 заполнена гелием, а емкости 1 и 3 воздухом.

Начальные условия ($t=0$):

$$T_1=T_2=T_3=300\text{K},$$

$$P_1=0,01\times 10^5 \text{ Па}, P_2=10,5\times 10^5 \text{ Па}, P_3=6,5\times 10^5 \text{ Па}.$$

Математическая модель

На третьем этапе расчет ПС проводился при следующих допущениях:

1. При моделировании процессов, протекающих в системе, за рабочее тело принят идеальный газ, подчиняющийся термическому уравнению состояния. Смесь газов также подчиняется уравнению состояния идеального газа;
2. Изменение состояния рабочего тела в полостях системы квазистатическое;
3. Процесс истечения рабочего тела из полостей системы через условные сопротивления принимается одномерным, установившимся, протекающим без трения и теплообмена. Потери при истечении рабочего тела, обусловленные принятыми допущениями, учитываются коэффициентами расхода.

На третьем этапе исследуются процессы, протекающие в трех емкостях исходной расчетной схемы, а расход газа рассчитывается только через два условных сопротивления. На этих сопротивлениях установлены обратные клапаны, предотвращающие обратный расход и образование газовых смесей второго порядка. Емкости, входящие в состав системы, в начальный момент времени заполнены разными газами, подчиняющимися законам идеального газа, а в емкости, куда они натекают, образуется смесь идеальных газов.

В соответствии с принятыми допущениями, математическая модель расчёта ПС для рассматриваемого варианта на третьем этапе выполнения домашнего задания представляет собой следующее.

Начальные условия для расчета ПС описывают состояние системы в момент времени $t=0$:

$$P_1=0,01 \times 10^5 \text{ Па}, P_2=10,5 \times 10^5 \text{ Па}, P_3=6,5 \times 10^5 \text{ Па}.$$

Для воздуха приняты показатель адиабаты и газовая постоянная:

$$k_{Air}=1,41$$

$$R_{Air} = 287,2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

Для гелия приняты показатель адиабаты и газовая постоянная:

$$k_{He}=1,66$$

$$R_{He} = 2077,4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}}$$

Коэффициент теплоотдачи принят:

$$\alpha = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{К}}$$

Уравнения математической модели:

- Уравнения расхода рабочего тела через условные сопротивления по формуле Сен-Венана и Ванцеля:

$$G_i = \pm(\mu * f)_i * P_A * \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_A} \left[\left(\frac{P_B}{P_A} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_B}{P_A} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \text{ при } \beta \geq \beta_{кр}$$

$$G_i = \pm(\mu * f)_i * P_A * \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_A} \left[(\beta_{кр})^{\frac{2}{k}} - (\beta_{кр})^{\frac{k+1}{k}} \right]} \text{ при } \beta < \beta_{кр}$$

где $i = 12, 13$ – номер условного сопротивления согласно рис. 1; P_A и P_B – наибольшее и наименьшее давления сосудов соответственно, которые сообщаются посредством соответствующего условного сопротивления; T_A –

температура в сосуде с наибольшим давлением; $\beta = \frac{P_B}{P_A}$ – отношение давлений;

$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ – критическое отношение давлений для соответствующего газа; μ – коэффициент расхода; f – площадь поперечного сечения условного сопротивления. В данной модели расход считается положительным, если направление истечения газа совпадает с выбранным направлением оси X (рис. 1).

- Показатель адиабаты и удельная газовая постоянная для смеси считаются следующим образом:

$$k_{CM} = k_{He} \cdot g^{He} + k_B(1 - g^{He})$$

$$R_{CM} = R_{He} \cdot g^{He} + R_B \cdot (1 - g^{He})$$

- Дифференциальные уравнения, описывающее изменение давления рабочего тела в полостях системы, с учётом отсутствия изменения объёма сосудов:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{k_{CM}}{V_1} \cdot (R_{CM}(T_{A1}G_{12} - T_{A2}G_{13}) + \frac{dQ_1}{dt} * (k_{CM} - 1))$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{k_{He}}{V_2} \cdot (-R_{He}T_{A1}G_{12} + \frac{dQ_2}{dt} * (k_{He} - 1))$$

$$\frac{dP_3}{dt} = \frac{k_{Air}}{V_3} \cdot (R_{Air}T_{A2}G_{13} + \frac{dQ_3}{dt} * (k_{Air} - 1))$$

где T_{Ai} – температура сосуда, из которого течёт газ, V – объём сосуда.

- Здесь изменение теплового потока через поверхность теплообмена, представляющую поверхность шара определяется следующим образом:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \alpha * S_{Ti} * (T_{Si} - T_i)$$

$$S_{Ti} = \pi * \left(\frac{6 * V_i}{\pi}\right)^{2/3}$$

- Дифференциальные уравнения, описывающее изменение температуры рабочего тела в полостях системы, с учётом отсутствия изменения объёма сосудов:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{T_1}{p_1 * V_1} \cdot [V_1 * \frac{dP_1}{dt} - R_{CM} * T_1 (G_{12} - G_{13}) + \frac{dQ_1}{dt} * (k_{CM} - 1)]$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{T_2}{p_2 * V_2} \cdot \left[V_2 * \frac{dP_2}{dt} + R_{He} * T_2 G_{12} + \frac{dQ_2}{dt} * (k_{He} - 1) \right]$$

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{T_3}{p_3 * V_3} \cdot [V_3 * \frac{dP_3}{dt} - R_{Air} * T_3 G_{13} + \frac{dQ_3}{dt} * (k_{Air} - 1)]$$

Конечные условия: $P_{min} \geq 0,95P_{max}$, где P_{min} и P_{max} – минимальное из давлений в сосудах соответственно. Таким образом, расчет прекращается в момент времени, когда параметры системы устанавливаются таким образом, что минимальное давление в полостях системы будет отличаться от максимального не более, чем на 5 %.

Программа расчёта на ЭВМ

Программа расчёта была написана на языке C# в среде Visual Studio Community. Программа расчёта имеет графический интерфейс (рис. 2) и использует методы объектно-ориентированного программирования. Программа позволяет вводить данные пневматической системы, отличные от заданного варианта и шаг времени для численного решения задачи. При нажатии на кнопку «Рассчитать» Программа выполняет численный расчёт пневматической системы и по окончании расчёта выводит данные в Excel, также строится графическая зависимость параметров пневматической системы от времени.

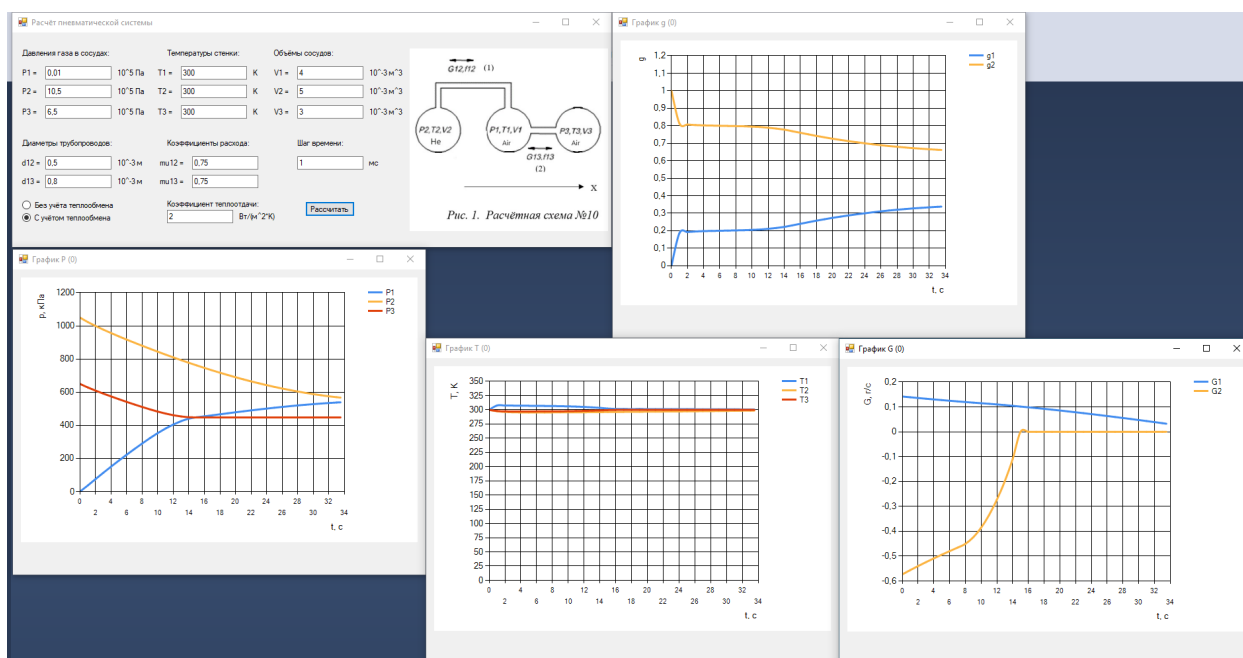


Рис. 2. Графический интерфейс программы расчёта

Код программы:

Класс PneumoCalc:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace PnumMixCalc
{
    //Перечисляемый тип воздух, гелий
    public enum Gases { Air, He, Mix };
    public class PneumoCalc
```



```

{
    //Газовая постоянная и показатель адиабаты для воздуха и He
    public readonly double RAir = 287.2;
    public readonly double KAir = 1.41;

    public readonly double RHe = 2077.4;
    public readonly double KHe = 1.66;

    //Инициализация переменных для хранения критического перепада давления гелия и
    воздуха
    double BKHe;
    double BKAir;

    //Конструктор класса, производящий расчёт критических перепадов давления
    public PneumoCalc()
    {
        BKHe = BKr(KHe);
        BKAir = BKr(KAir);
    }

    /// <summary>
    /// Расчёт критического перепада давления
    /// </summary>
    /// <param name="K">Показатель адиабаты соответствующего газа</param>
    /// <returns></returns>
    public double BKr(double K)
    {
        return Math.Pow(2/(K+1),K/(K-1));
    }

    /// <summary>
    /// Определение эффективной площади поперечного сечения условного сопротивления
    /// </summary>
    /// <param name="Mu">Коэффициент расхода</param>
    /// <param name="D">Диаметр условного сопротивления</param>
    /// <returns></returns>
    public double Section(double Mu, double D)
    {
        return Mu * Math.PI * D * D / 4;
    }

    /// <summary>
    /// Расчёт площади поверхностей сосудов
    /// </summary>
    /// <param name="V"></param>
    /// <returns></returns>
    public double Surface(double V)
    {
        return Math.PI*Math.Pow(6*V/Math.PI,2/3);
    }

    /// <summary>
    /// Определение направления расхода
    /// </summary>
    /// <param name="pL">Давление левого сосуда</param>
    /// <param name="pR">Давление правого сосуда</param>
    /// <returns></returns>
    public int FlowDirection(double pL, double pR)
    {
        if (pL > pR) return 1;
        else return -1;
    }

    /// <summary>
    /// Определение расхода

```

```

    /// </summary>
    /// <param name="F">Площадь эффективного поперечного сечения условного
сопротивления</param>
    /// <param name="pL">Давление "левого" сосуда</param>
    /// <param name="pR">Давление "правого" сосуда</param>
    /// <param name="TpA">Температура сосуда с наибольшим давлением</param>
    /// <param name="b">Род чистого газа</param>
    /// <returns></returns>
    public double Flow(double F, double pL, double pR, double TpA, Gases b)
    {
        try
        {
            //Определение максимального и минимального давлений
            double pA = Math.Max(pL, pR);
            double pB = Math.Min(pL, pR);

            //Инициализация переменных
            double BK;
            double K;
            double R;
            double G;

            //Определение характеристики газа в зависимости от его рода
            switch (b)
            {
                case Gases.Air:
                    BK = BKAir;
                    K = KAir;
                    R = RAir;
                    break;

                case Gases.He:
                    BK = BKHe;
                    K = KHe;
                    R = RHe;
                    break;

                default:
                    BK = 0;
                    K = 0;
                    R = 0;
                    break;
            }

            //Расчёт возможного расхода (без учёта обратного клапана)
            G = FlowDirection(pL, pR) * F * pA * Math.Sqrt(2 * K / ((K - 1) * R *
TpA)) * Math.Sqrt(Math.Pow(Math.Max(pB / pA, BK), 2 / K) - Math.Pow(Math.Max(pB / pA,
BK), (K + 1) / K));

            //Обратный клапан (зануление расхода в случае обратного потока)
            switch (b)
            {
                case Gases.Air:
                    if (G > 0)
                    {
                        G = 0;
                    }
                    break;

                case Gases.He:
                    if (G < 0)
                    {
                        G = 0;
                    }
                    break;
            }
        }
    }
}

```

```

        }
        break;

        default:
            G = 0;
            break;
    }

    return G;
}

catch (Exception)
{
    MessageBox.Show("Ошибка Определения расхода!");
    return 0;
}
}
}
}

```

Класс главной формы:

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.Diagnostics;

namespace PnumMixCalc
{
    public partial class MainForm : Form
    {
        //Инициализация переменных
        const int countOfArr = 10000000;
        double[] P = new double[4];
        List<double> PCheck = new List<double>(); //Динамический массив давлений
        double[] PLast = new double[3];

        double[] dPdt = new double[4];
        double[] Ts = new double[4];
        double[] T = new double[4];
        double[] dTdt = new double[4];
        double[] dQdt = new double[4];
        double[] V = new double[4];
        double[] D = new double[3];
        double[] Mu = new double[3];
        double[] G = new double[3];
        double[] TPmax = new double[3];

        double[,] PRes = new double[4, countOfArr];
        double[,] TRes = new double[4, countOfArr];
        double[,] GRes = new double[3, countOfArr];

        double DT = new double();
        double Alpha = new double();
    }
}

```

```

int pY = new int(); //Переменная для сдвига окон графиков

//Создание объектов класса расчёта системы
PneumoCalc Calc = new PneumoCalc();

public MainForm()
{
    InitializeComponent(); //Инициализация компонентов на форме окна Windows
}
/// <summary>
/// Перевод текста в элементы массива
/// </summary>
public void ReadData()
{
    try
    {
        //Перевод данных в double
        P[1] = double.Parse(textP1.Text) * Math.Pow(10, 5);
        P[2] = double.Parse(textP2.Text) * Math.Pow(10, 5);
        P[3] = double.Parse(textP3.Text) * Math.Pow(10, 5);

        T[1] = double.Parse(textT1.Text);
        T[2] = double.Parse(textT2.Text);
        T[3] = double.Parse(textT3.Text);

        Ts[1] = double.Parse(textT1.Text);
        Ts[2] = double.Parse(textT2.Text);
        Ts[3] = double.Parse(textT3.Text);

        V[1] = double.Parse(textV1.Text) * Math.Pow(10, -3);
        V[2] = double.Parse(textV2.Text) * Math.Pow(10, -3);
        V[3] = double.Parse(textV3.Text) * Math.Pow(10, -3);

        D[1] = double.Parse(textD12.Text) * Math.Pow(10, -3);
        D[2] = double.Parse(textD13.Text) * Math.Pow(10, -3);

        Mu[1] = double.Parse(textMu12.Text);
        Mu[2] = double.Parse(textMu13.Text);

        DT = double.Parse(textStep.Text) / 1000;

        //Определение модели расчёта (с теплообменом или без)
        if (radioTerm.Checked == true)
            Alpha = double.Parse(textAlpha.Text);
        else Alpha = 0;
    }
    catch (Exception)
    {
        MessageBox.Show("Ошибка ввода!");
    }
}

/// <summary>
/// Нажатие на кнопку расчёт
/// </summary>
/// <param name="sender"></param>
/// <param name="e"></param>
private void bCalc_Click(object sender, EventArgs e)
{
    //Удаление лишних процессов Excel
    try

```

```

{
    foreach (Process proc in Process.GetProcessesByName("Microsoft Excel"))
    {
        proc.Kill();
    }
}
catch (Exception ex)
{
    MessageBox.Show(ex.Message);
}

//Создание нового документа Excel
Excel myExcel = new Excel();
myExcel.NewDocument();

//Создание объектов класса Графическое окно, их настройка и инициализация
ChartForm PChart = new ChartForm
{
    Location = new Point(this.Location.X, this.Location.Y + 450 + pY),
    Text = "График P (" + (pY / 50).ToString() + ")"
};

PChart.Show();
PChart.chart.ChartAreas[0].AxisY.Title = "p, кПа";
PChart.chart.ChartAreas[0].AxisY.Interval = 200;

ChartForm TChart = new ChartForm
{
    StartPosition = FormStartPosition.Manual,
    Location = new Point(PChart.Location.X + 650, PChart.Location.Y),
    Text = "График T (" + (pY / 50).ToString() + ")"
};

TChart.Show();
TChart.chart.ChartAreas[0].AxisY.Title = "T, К";
TChart.chart.ChartAreas[0].AxisY.Interval = 25;

ChartForm GChart = new ChartForm
{
    StartPosition = FormStartPosition.Manual,
    Location = new Point(TChart.Location.X + 650, PChart.Location.Y),
    Text = "График G (" + (pY / 50).ToString() + ")"
};

GChart.Show();
GChart.chart.ChartAreas[0].AxisY.Title = "G, г/с";
GChart.chart.ChartAreas[0].AxisY.Interval = 0.10;

//Вывод по массовой концентрации
ChartForm MChart = new ChartForm
{
    StartPosition = FormStartPosition.Manual,
    Location = new Point(GChart.Location.X, PChart.Location.Y - 440),
    Text = "График g (" + (pY / 50).ToString() + ")"
};

MChart.Show();
MChart.chart.ChartAreas[0].AxisY.Title = "g";
MChart.chart.ChartAreas[0].AxisY.Interval = 0.1;

pY = pY + 50; //Сдвиг для новых окон (при следующем нажатии на кнопку)

//Настройка графиков

```

```

        for (int i = 0; i < 3; i++)
        {
            PChart.chart.Series.Add("P" + (i + 1).ToString());
            PChart.chart.Series[i].ChartType =
System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Spline;
            PChart.chart.Series[i].BorderWidth = 3;

            TChart.chart.Series.Add("T" + (i + 1).ToString());
            TChart.chart.Series[i].ChartType =
System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Spline;
            TChart.chart.Series[i].BorderWidth = 3;

        }

        for (int i = 0; i < 2; i++)
        {
            GChart.chart.Series.Add("G" + (i + 1).ToString());
            GChart.chart.Series[i].ChartType =
System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Spline;
            GChart.chart.Series[i].BorderWidth = 3;

            MChart.chart.Series.Add("g" + (i + 1).ToString());
            MChart.chart.Series[i].ChartType =
System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.SeriesChartType.Spline;
            MChart.chart.Series[i].BorderWidth = 3;

        }

//Получение данных газовой постоянной и показателя адиабаты для воздуха и
гелия

double RAir = Calc.RAir;
double KAir = Calc.KAir;

double RHe = Calc.RHe;
double KHe = Calc.KHe;

//Инициализация переменных для анализа max/min
double Pmax = new double();
double Pmin = new double();

//Чтение данных с окна формы
ReadData();

double[] F = new double[3]; //Эффективное сечение

//Определение Эффективных сечений
for (int i = 1; i < 3; i++)
{
    F[i] = Calc.Section(Mu[i], D[i]);
}

double[] S = new double[4]; //Площадь поверхности

for (int i = 1; i < 4; i++)
{
    S[i] = Calc.Surface(V[i]);
}

int n = 0;
double tt = 0;
int gt = 1000; //шаг вывода на графики
string lbl = ""; //строка вывода

//Вывод первой строки заголовка в Excel
myExcel.SetValue("A1", "t,c");

```

```

myExcel.SetValue("B1", "P1,Па");
myExcel.SetValue("C1", "P2,Па");
myExcel.SetValue("D1", "P3,Па");

myExcel.SetValue("F1", "T1,K");
myExcel.SetValue("G1", "T2,K");
myExcel.SetValue("H1", "T3,K");

myExcel.SetValue("J1", "G12,г/с");
myExcel.SetValue("K1", "G13,г/с");

myExcel.SetValue("M1", "gHe");
myExcel.SetValue("N1", "gAir");

//Определение начальной массы воздуха в сосуде смеси (Согласно ТЗ, там имелся
воздух)
double MAir = P[1] * V[1] / (RAir * T[1]);

//Инициализация переменной массы по гелию
double MHe = 0;

//Инициализация массовых концентраций
double[] gHe = new double[countOfArr];
double[] gAir = new double[countOfArr];

//Массовая концентрация в начальный момент времени
gAir[0] = 1;
gHe[0] = 0;

//Инициализация показателя адиабаты и удельной газовой постоянной для смеси
double K = 0;
double R = 0;

do //ЦИКЛ
{

    //Определение температур исходящих потоков
    if (P[1] > P[2]) TPmax[1] = T[1];
    else TPmax[1] = T[2];

    if (P[3] > P[1]) TPmax[2] = T[3];
    else TPmax[2] = T[1];

    //Определение расходов
    G[1] = Calc.Flow(F[1], P[2], P[1], TPmax[1], Gases.He);

    G[2] = Calc.Flow(F[2], P[1], P[3], TPmax[2], Gases.Air);

    //Определение масс после натекания за промежуток времени DT
    MAir = MAir - G[2] * DT; //Знак "минус" связан с тем, что расход имеет
знак, и для воздуха он отрицательный (газ течёт против оси OX)
    MHe = MHe + G[1] * DT;

    //Определение Массовых концентраций
    gAir[n + 1] = MAir / (MAir + MHe);
    gHe[n + 1] = MHe / (MAir + MHe);

    //Определение показателя адиабаты и удельной газовой постоянной
    K = KHe * gHe[n + 1] + KAir * (1 - gHe[n + 1]);
    R = RHe * gHe[n + 1] + RAir * (1 - gHe[n + 1]);

```

```

//Определение тепловых потоков
for (int i = 1; i < 4; i++)
{
    dQdt[i] = Alpha * S[i] * (Ts[i] - T[i]);
}

//Вывод текущих данных в матрицу
for (int i = 0; i < 2; i++)
{
    PRes[i, n] = P[i + 1];
    TRes[i, n] = T[i + 1];
    GRes[i, n] = G[i + 1];
}
PRes[2, n] = P[2 + 1];
TRes[2, n] = T[2 + 1];

//БЛОК ВЫВОДА
if ((n % gt == 0) | (n == 0))
{
    //Вывод данных в Excel
    lbl = ((int)(n / gt) + 2).ToString();//переменная номера ячейки excel

    myExcel.SetValue("A" + lbl, (Math.Round(tt, 3)).ToString());

    myExcel.SetValue("B" + lbl, (Math.Round(PRes[0, n])).ToString());
    myExcel.SetValue("C" + lbl, (Math.Round(PRes[1, n])).ToString());
    myExcel.SetValue("D" + lbl, (Math.Round(PRes[2, n])).ToString());

    myExcel.SetValue("F" + lbl, (Math.Round(TRes[0, n], 1)).ToString());
    myExcel.SetValue("G" + lbl, (Math.Round(TRes[1, n], 1)).ToString());
    myExcel.SetValue("H" + lbl, (Math.Round(TRes[2, n], 1)).ToString());

    myExcel.SetValue("J" + lbl, (Math.Round(GRes[0, n] * 1000,
2)).ToString());
    myExcel.SetValue("K" + lbl, (Math.Round(GRes[1, n] * 1000,
2)).ToString());

    myExcel.SetValue("M" + lbl, (Math.Round(gHe[n], 3)).ToString());
    myExcel.SetValue("N" + lbl, (Math.Round(gAir[n], 3)).ToString());

    //Вывод графиков концентраций
    MChart.chart.Series[0].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3),
Math.Round(gHe[n], 3));
    MChart.chart.Series[1].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3),
Math.Round(gAir[n], 3));

    //Вывод данных на график
    for (int i = 0; i < 3; i++)
    {
        PChart.chart.Series[i].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3), PRes[i, n]
/ 1000);
        TChart.chart.Series[i].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3), TRes[i,
n]);
    }
    for (int i = 0; i < 2; i++)
    {
        GChart.chart.Series[i].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3), GRes[i, n]
* 1000);
    }
}

```



```

n = n + 1;
tt = tt + DT;

//Определение изменений давления и температуры
dPdt[2] = -1 * KHe * RHe / V[2] * TPmax[1] * G[1] + KHe / V[2] * (KHe -
1) * dQdt[2];
dTdt[2] = T[2] / (P[2] * V[2]) * (V[2] * dPdt[2] - (-1) * RHe * T[2] *
G[1] + (KHe - 1) * dQdt[2]);

dPdt[1] = K * R / V[1] * (TPmax[1] * G[1] - TPmax[2] * G[2]) + K / V[1] *
(K - 1) * dQdt[1];
dTdt[1] = T[1] / (P[1] * V[1]) * (V[1] * dPdt[1] - R * T[1] * (G[1] -
G[2]) + (K - 1) * dQdt[1]);

dPdt[3] = KAir * RAir / V[3] * (TPmax[2] * G[2]) + KAir / V[3] * (KAir -
1) * dQdt[3];
dTdt[3] = T[3] / (P[3] * V[3]) * (V[3] * dPdt[3] - RAir * T[3] * G[2] +
(KAir - 1) * dQdt[3]);

PCheck.Clear(); //Очистка динамического массива

//Пересчёт новых давлений
for (int i = 1; i < 4; i++)
{
    PLast[i - 1] = P[i];

    P[i] = P[i] + dPdt[i] * DT;
    T[i] = T[i] + dTdt[i] * DT;

    if (P[i] != PLast[i - 1]) //Если давление изменяется, то добавить к
сравнению
        PCheck.Add(P[i]);
}

//Определение максимального и минимального давлений, если есть, что
сравнивать
if (PCheck.LongCount() == 0)
{
    MessageBox.Show("Давления не изменятся!!!");
    break;
}
else
{
    Pmax = PCheck.Max();
    Pmin = PCheck.Min();
}

} while (Pmin <= 0.95 * Pmax); //Условие окончания счёта - разница между max
и min не больше 5%

lbl = ((int)(n / gt) + 3).ToString();
n--;

//Вывод последних значений следующих величин: расходов, давлений, температур
и массовых концентраций
myExcel.SetValue("A" + lbl, (Math.Round(tt, 3)).ToString());

myExcel.SetValue("B" + lbl, (Math.Round(PRes[0, n])).ToString());
myExcel.SetValue("C" + lbl, (Math.Round(PRes[1, n])).ToString());
myExcel.SetValue("D" + lbl, (Math.Round(PRes[2, n])).ToString());

myExcel.SetValue("F" + lbl, (Math.Round(TRes[0, n], 1)).ToString());

```

```

myExcel.SetValue("G" + lbl, (Math.Round(TRes[1, n], 1)).ToString());
myExcel.SetValue("H" + lbl, (Math.Round(TRes[2, n], 1)).ToString());

myExcel.SetValue("J" + lbl, (Math.Round(GRes[0, n] * 1000, 2)).ToString());
myExcel.SetValue("K" + lbl, (Math.Round(GRes[1, n] * 1000, 2)).ToString());

myExcel.SetValue("M" + lbl, (Math.Round(gHe[n], 3)).ToString());
myExcel.SetValue("N" + lbl, (Math.Round(gAir[n], 3)).ToString());

//Вывод данных на график
for (int i = 0; i < 3; i++)
{
    PChart.chart.Series[i].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3), PRes[i, n] /
1000);
    TChart.chart.Series[i].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3), TRes[i, n]);
}
for (int i = 0; i < 2; i++)
{
    GChart.chart.Series[i].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3), GRes[i, n] *
1000);
}

//Вывод графиков концентраций
MChart.chart.Series[0].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3), Math.Round(gHe[n + 1],
3));
MChart.chart.Series[1].Points.AddXY(Math.Round(tt, 3), Math.Round(gAir[n +
1], 3));

//Развёртывание окна excel
myExcel.Visible = true;

}

}

}

```

Точка входа в программу:

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;

namespace PnumSysCalc
{
    static class Program
    {
        /// <summary>
        /// Главная точка входа для приложения.
        /// </summary>
        [STAThread]
        static void Main()
        {
            Application.EnableVisualStyles();
            Application.SetCompatibleTextRenderingDefault(false);
            Application.Run(new MainForm()); //Запуск главного окна
        }
    }
}

```

Результаты расчёта

Таблица 2. Результаты расчёта

t,с	P1, кПа	P2, кПа	P3, кПа	T1,К	T2,К	T3,К	G12,г/с	G13,г/с	gHe	gAir
0	1,00	1050,00	650,00	300	300	300	0,14	-0,57	0	1
1	37,62	1022,93	628,62	307,7	297,5	298	0,14	-0,56	0,187	0,813
2	76,27	999,12	609,51	307,6	296,3	297,3	0,14	-0,54	0,193	0,807
3	114,26	977,20	591,56	307,5	295,7	297,1	0,13	-0,52	0,196	0,804
4	151,39	956,47	574,36	307,3	295,4	297,1	0,13	-0,51	0,198	0,802
5	187,64	936,54	557,72	307,2	295,4	297,2	0,13	-0,49	0,199	0,801
6	223,00	917,20	541,60	307	295,4	297,2	0,13	-0,48	0,2	0,8
7	257,47	898,34	525,94	306,9	295,4	297,3	0,12	-0,47	0,201	0,799
8	291,05	879,91	510,74	306,7	295,5	297,4	0,12	-0,45	0,202	0,798
9	323,33	861,87	496,25	306,5	295,6	297,5	0,12	-0,42	0,203	0,797
10	353,59	844,21	482,89	306,1	295,7	297,7	0,12	-0,39	0,205	0,795
11	381,15	826,91	471,07	305,7	295,7	297,9	0,11	-0,33	0,207	0,793
12	405,34	809,96	461,17	305,1	295,8	298,2	0,11	-0,27	0,211	0,789
13	425,45	793,39	453,58	304,4	295,9	298,6	0,11	-0,2	0,216	0,784
14	440,56	777,28	448,76	303,5	296	299	0,1	-0,11	0,222	0,778
15	448,84	761,64	447,64	302,3	296,1	299,6	0,1	0	0,231	0,769
16	454,54	746,44	447,90	301,6	296,2	299,9	0,1	0	0,24	0,76
17	460,63	731,69	447,96	301,4	296,4	300	0,1	0	0,249	0,751
18	466,76	717,42	447,98	301,3	296,5	300	0,09	0	0,258	0,742
19	472,85	703,64	447,98	301,3	296,6	300	0,09	0	0,266	0,734
20	478,83	690,37	447,99	301,3	296,7	300	0,09	0	0,274	0,726
21	484,68	677,63	447,99	301,2	296,8	300	0,08	0	0,281	0,719
22	490,37	665,41	447,99	301,2	297	300	0,08	0	0,288	0,712
23	495,89	653,75	447,99	301,2	297,1	300	0,08	0	0,294	0,706
24	501,21	642,66	447,99	301,1	297,2	300	0,07	0	0,3	0,7
25	506,33	632,14	447,99	301,1	297,4	300	0,07	0	0,306	0,694
26	511,21	622,20	447,99	301	297,5	300	0,06	0	0,311	0,689
27	515,84	612,87	447,99	301	297,7	300	0,06	0	0,316	0,684
28	520,21	604,15	447,99	300,9	297,8	300	0,06	0	0,32	0,68
29	524,31	596,04	447,99	300,9	298	300	0,05	0	0,324	0,676
30	528,12	588,57	447,99	300,8	298,1	300	0,05	0	0,328	0,672
31	531,63	581,73	447,99	300,8	298,3	300	0,04	0	0,331	0,669
32	534,84	575,53	447,99	300,7	298,4	300	0,04	0	0,334	0,666
33	537,72	569,98	447,99	300,6	298,6	300	0,03	0	0,337	0,663
33,51	539,06	567,43	447,99	300,6	298,6	300	0,03	0	0,338	0,662

Результаты расчёта для рассматриваемого варианта сведены в таблицу 2.

Графики результатов представлены на рис. 3-6.

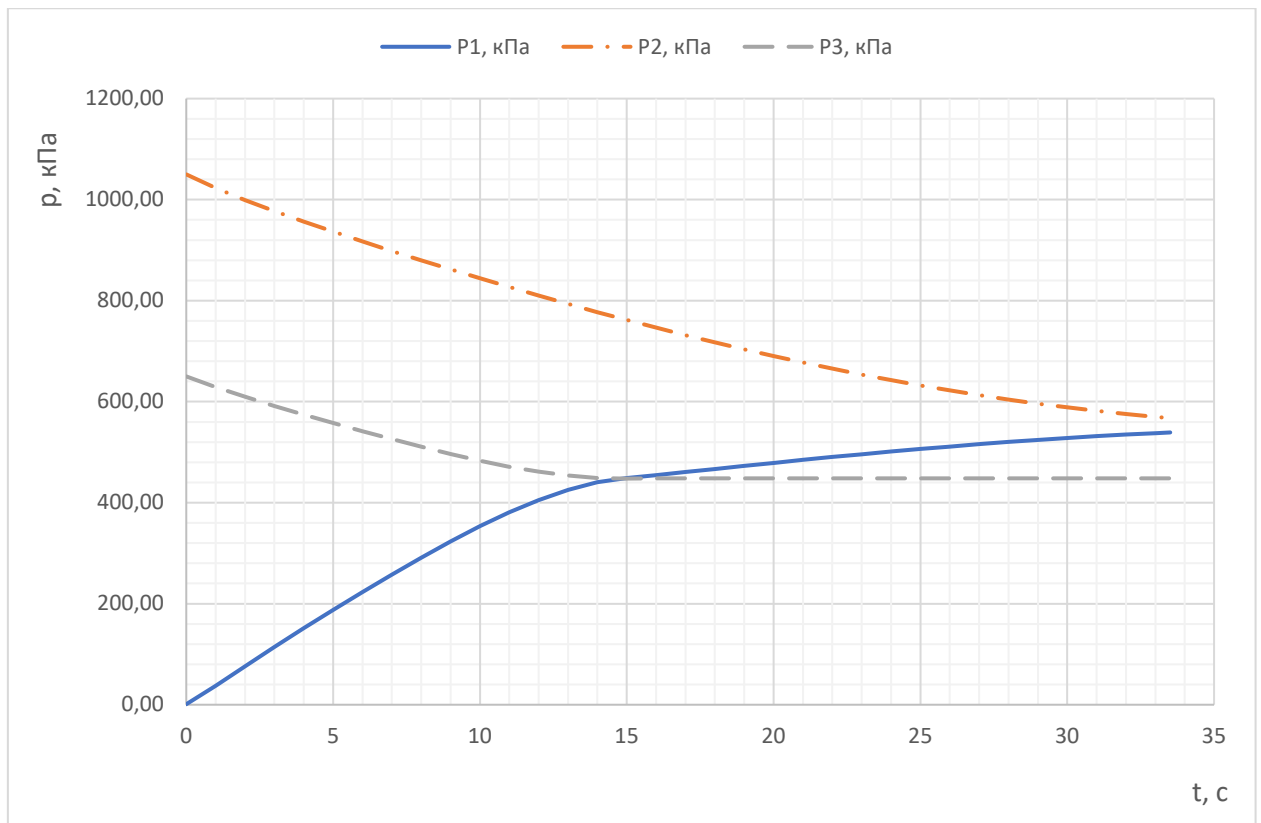


Рис. 3. График зависимости давления в сосудах от времени

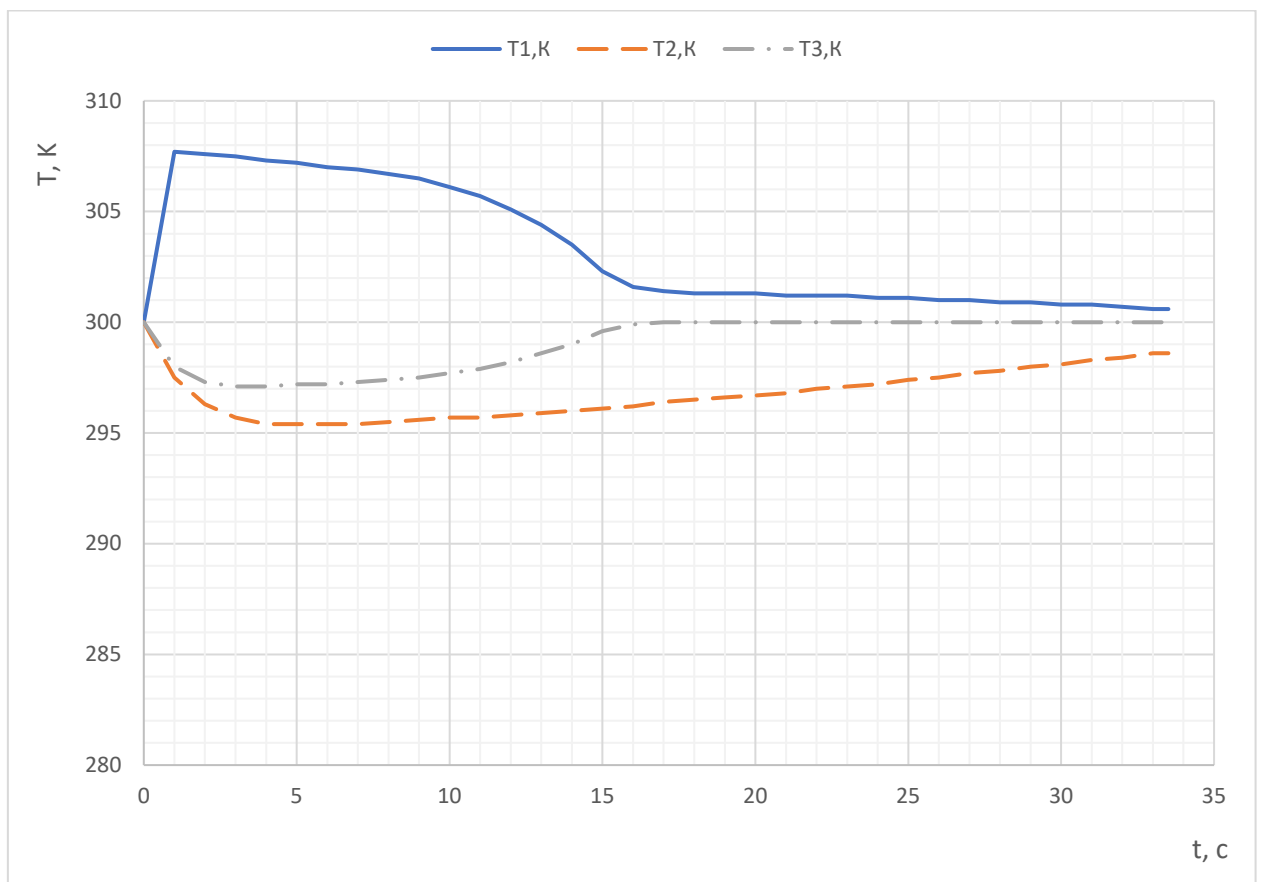


Рис. 4. График зависимости температуры в сосудах от времени

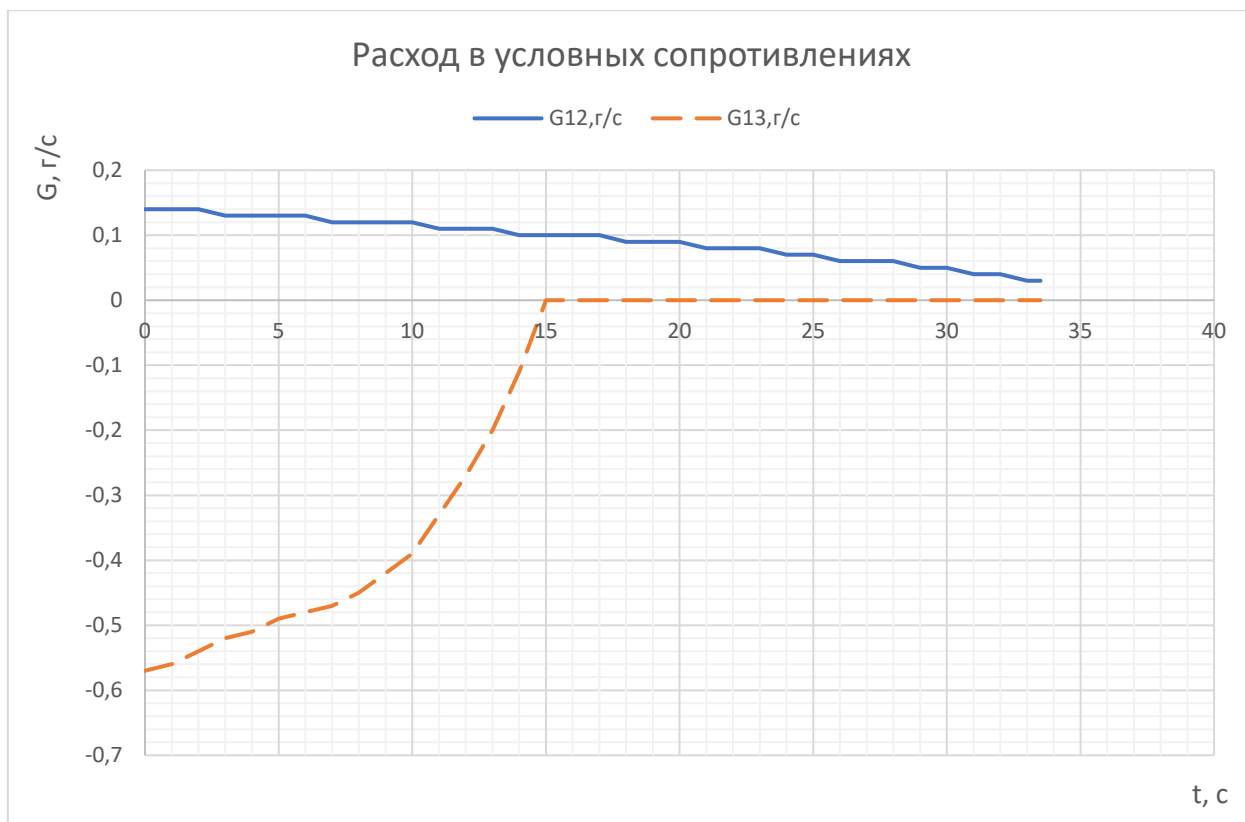


Рис. 5. График зависимости расходов через условные сопротивления от времени

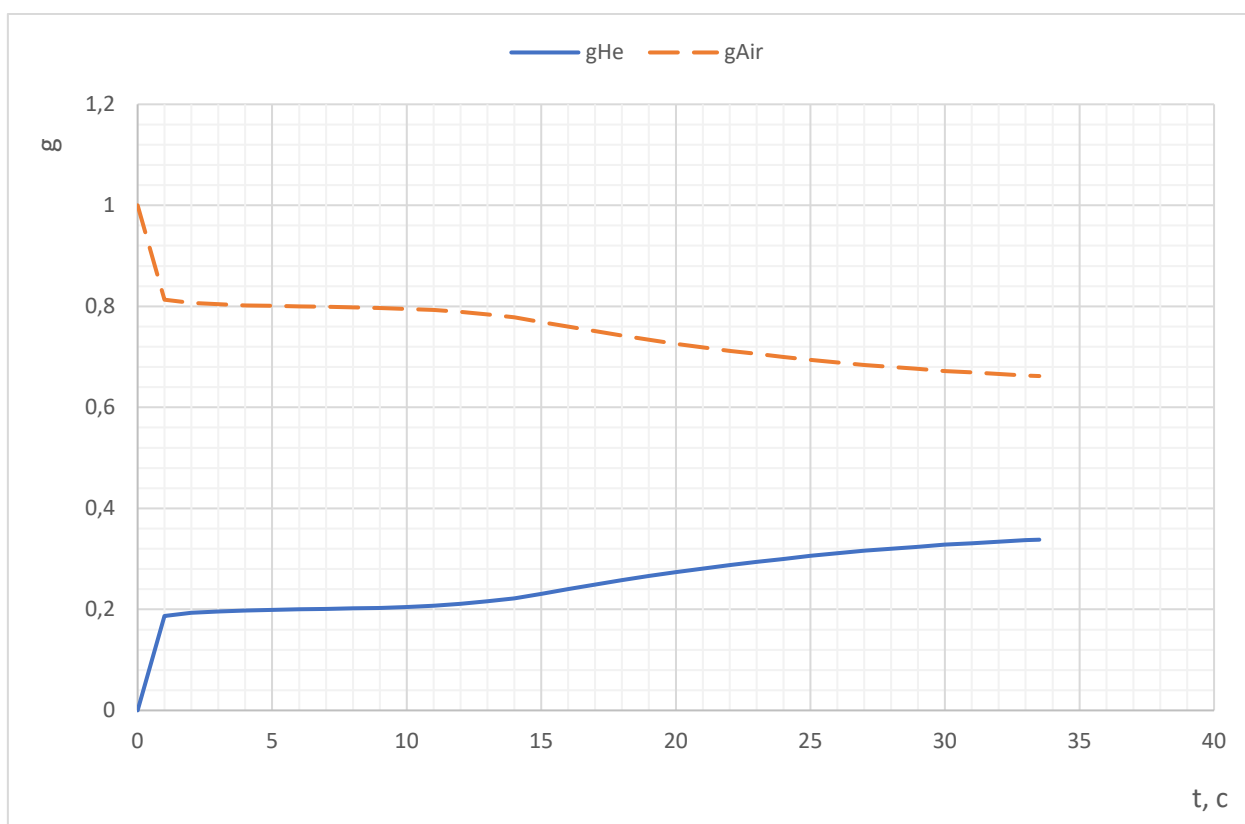


Рис. 6. График зависимости массовых концентраций газов в первом сосуде от времени

Анализ полученных результатов

Таким образом, можно сделать выводы:

- Когда перепад давления изменяет направление расход в условном сопротивлении отсутствует – обратный клапан смоделирован верно.
- Расходы в условных сопротивлениях стремятся к 0 при стремлении системы к равновесию, и максимальны в начальный момент времени.
- При отсутствии расхода из третьего сосуда, давление в нём увеличивается вследствие теплообмена с окружающей средой (температура газа возрастает).
- При стремлении системы к равновесию температуры газа стремятся к начальному значению, т.к. учтен фактор наличия теплообмена между стенками и газом.
- Сумма концентраций компонентов газовой смеси в каждый момент времени равняется 1 – верно смоделирован процесс смешения газов.

Получаем, что математическая модель полностью удовлетворяет ожиданиям, основанным на физическом представлении о природе протекающих процессов.