

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 Анализ предметной области.....	6
1.1 Описание продуктов реакции .....	6
2 Объект проектирования и его особенности.....	8
3. Математическая модель заданного объекта.....	10
3.1 Исходные данные .....	10
3.2 Построение математической модели .....	10
4. Исследование метода оптимизации .....	12
5. Оптимизация объекта проектирования.....	13
6. Проверка работоспособности спроектированного объекта.....	14
7 Практическая реализация. Описание программы.....	14
7.1 Подсистема расчета моделей. ....	12
7.2 Подсистема визуализации графиков.....	12
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	13
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	14
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) Примеры работы программы .....	15
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) Блок-схема алгоритма оптимизации.....	16
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) Распечатка программных модулей .....	20

					ТГТУ.09.03.01.019 КР ТЭ-ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дат				
Разраб.	Прокудина				Моделирование и оптимизация контактного аппарата производства синильной	Лит.	Лист	Листов
Пров.	Литовка						1	19
						САПР, гр. БВТ-181		
Н. Контр.	Литовка							
Утв.	Коробова							

## ВВЕДЕНИЕ

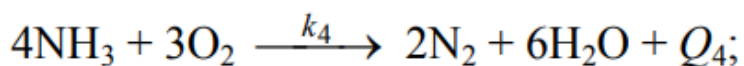
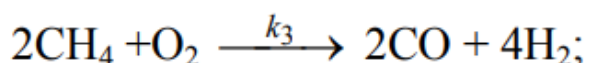
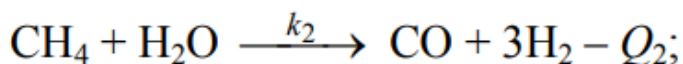
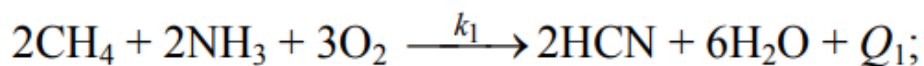
Данная курсовая работа представляет собой завершающий этап изучения дисциплины «Модели и методы анализа проектных решений». Целью работы является обобщение и систематизация полученных знаний, а также получение практических навыков по разработке и оптимизации математических моделей технологических объектов. В рамках данной работы поставлена задача моделирования и оптимизации контактного аппарата производства синильной кислоты.

Необходимо:

- построить математическую модель проектируемого объекта;
- разработать алгоритмы оптимизации и имитационного моделирования;
- составить и отладить программы для решения уравнений математической модели, задач оптимизации и имитационного моделирования;
- расчет заданий по полученным программам.

## 1 Анализ предметной области

В данной курсовой работе стоит следующая задача: найти методом штрафных функций площадь поверхности теплообмена и объемный расход реакционной смеси на входе в контактный аппарат производства синильной кислоты, при этом концентрация синильной кислоты на выходе будет максимальной:



А также проверить полученные данные с помощью имитационного моделирования.

### 1.2 Описание продуктов реакции

В реакциях, которые представлены в постановке задачи, участвуют восемь веществ. Однако синильная кислота образуется из взаимодействия следующих веществ:

Метан - простейший по составу предельный углеводород, при нормальных условиях бесцветный газ без вкуса и запаха, описывается формулой  $\text{CH}_4$ . Основной компонент природного газа (80-98%), попутных нефтяных газов и газов, скапливающихся в шахтах и рудниках. Также метан производится бактериями в болотах (отсюда синоним метана: «болотный газ») и в кишечнике жвачных животных.

Аммиак - бинарное неорганическое химическое соединение азота и водорода, имеющее формулу  $\text{NH}_3$ , при нормальных условиях - бесцветный газ с резким характерным запахом. Растворимость в воде чрезвычайно велика - около 1200 объемов (при 0 °С) или 700 объёмов (при 20 °С) в объеме воды.

					ТГТУ.09.03.01.019 КР ТЭ-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		3

Кислород - химически активный неметалл, является самым лёгким элементом из группы халькогенов. Как простое вещество (при нормальных условиях) кислород - газ без цвета, вкуса и запаха, молекула которого состоит из двух атомов (формула -  $O_2$ ), в связи с чем его также называют «диоксиген».

Вода - бинарное неорганическое соединение с химической формулой  $H_2O$ : молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного - кислорода. При нормальных условиях представляет собой прозрачную жидкость, не имеющую цвета (при малой толщине слоя), запаха и вкуса.

Синильная кислота - химическое соединение с формулой  $HCN$ . Бесцветная, очень летучая, легкоподвижная ядовитая жидкость, имеющая неприятный запах (некоторые люди не способны ощущать её запах, порог чувствительности широко варьируется по популяции). Синильная кислота содержится в некоторых растениях, коксовом газе, табачном дыме, выделяется при термическом разложении нейлона, полиуретанов.

Является сырьём для получения акрилонитрила, метилметакрилата, адипонитрила и других соединений. Синильная кислота и большое число её производных используются при извлечении благородных металлов из руд, при гальванопластическом золочении и серебрении, в производстве ароматических веществ, химических волокон, пластмасс, каучука, органического стекла, стимуляторов роста растений, гербицидов.

В настоящий момент существуют три наиболее распространенных метода получения синильной кислоты в промышленных масштабах:

- Метод Андрусова: прямой синтез из аммиака и метана в присутствии воздуха и платинового катализатора при высокой температуре;
- Метод ВМА (Blausäure aus Methan und Ammoniak), запатентованный фирмой Degussa: прямой синтез из аммиака и метана в присутствии платинового катализатора при высокой температуре;

- Побочный продукт при производстве акрилонитрила путем окислительного аммонолиза пропилена.

Выбор того или иного метода зависит от необходимой плотности выходного продукта реакции.

## 2 Объект проектирования и его особенности.

Из всех описанных выше методов получения синильной кислоты под поставленную задачу подходит метод Андрусова.

В методе Андрусова вводится воздух для того, чтобы сжечь небольшое количество  $\text{CH}_4$  для обеспечения необходимого тепла для протекания реакции. Таким образом, получение  $\text{HCN}$  с использованием последнего метода является реакцией, протекающей в аммиачной среде.

При использовании метода Андрусова процесс протекает адиабатически при температуре около  $1100^\circ\text{C}$ . Оптимальный состав исходного продукта определяется как компромисс между селективностью химического превращения  $\text{NH}_3$  в  $\text{HCN}$ , которое предпочтительно для высокого соотношения  $\text{CH}_4/\text{NH}_3$  при фиксированном отношении воздух/топливо, и общей скоростью получения  $\text{HCN}$ , которая предпочтительна для относительно низкого соотношения  $\text{CH}_4/\text{NH}_3$ . Время контакта чрезвычайно мало (менее чем 1 миллисекунда), что предотвращает разложение готовой  $\text{HCN}$ . Типичный катализатор в методе Андрусова состоит из проволочной сетки, содержащей 90% вес. Pt и 10% вес. Rh. Допустимое время жизни катализатора составляет от 60 до 360 дней. Примерно 65-70% аммиака превращается в  $\text{HCN}$ , и примерно 10% аммиака превращается в  $\text{N}_2$ . Для того чтобы избежать разложения  $\text{HCN}$ , газовые продукты, содержащие примерно 6-12%  $\text{HCN}$ , быстро охлаждаются до температуры  $350-400^\circ\text{C}$  в котле-утилизаторе. (рис. 2.1)

					ТГТУ.09.03.01.019 КР ТЭ-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		5

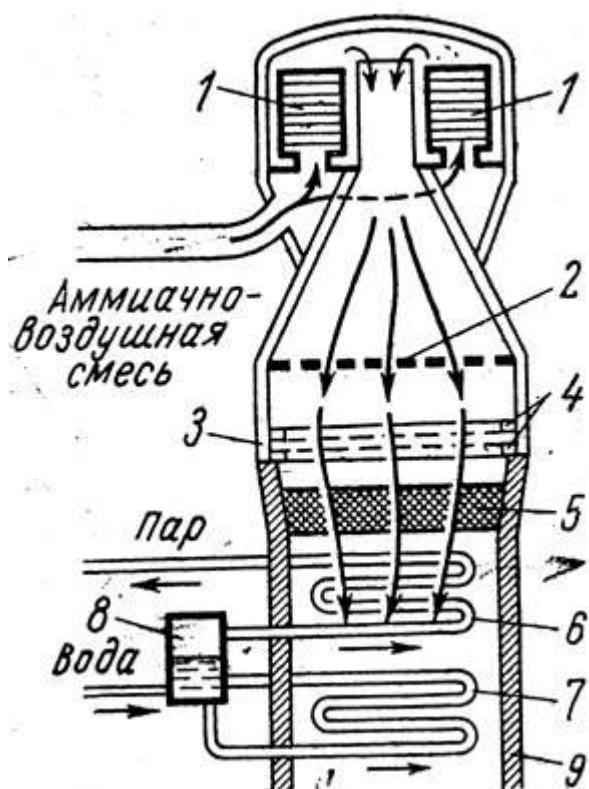


Рисунок 2.1. Контактный аппарат для окисления аммиака под атмосферным давлением: 1 - фильтр для пористого картона; 2 - распределительная решётка; 3 - сетка катализатора; 4 - стальные кольца; 5 - корзина с  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ -катализатором; 6 - змеевик пароперегревателя; 7 - котёл-утилизатор; 8 - паропотделитель; 9- футеровка из огнеупорного кирпича.

Контактные аппараты – это аппараты «идеального смешения». Они характеризуются высокой степенью однородности содержимого объема. Интенсивность циркуляции жидкости в нем такова, что поступающий поток мгновенно и равномерно перемешивается со всей массой, уже находящейся в аппарате.[2]

Прежде чем построить установку(оригинал) такого сложного реактора, целесообразно создать ее модель или несколько моделей. Из результатов их работы можно узнать необходимые параметры для наилучшей работы устройства. При этом чтобы такое моделирование имело смысл, оно должно удовлетворять двум требованиям: экономичность и трудуктивность. Экономичность означает, что исследование на модели должно быть более экономичным, чем

непосредственно исследование оригинала. Трактуемость означает, что необходимо знать, как по результатам испытания модели определить интересующие нас параметры оригинала. При этом чаще всего интересует количественная трактуемость.[3]

Для получения численных результатов работы необходимо описать оригинал языком математики, или по-другому составить математическую модель установки.

### 3. Математическая модель заданного объекта

#### 3.1 Исходные данные

Порядок реакций  $\alpha_1 = 3$ ,  $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 2$  предэкспоненциальный множитель  $A_1=10000$ ,  $A_2=20\ 000$ ,  $A_3=50\ 000$ ,  $A_4=500$  и энергия активации уравнения Аррениуса для вычисления константы скорости реакции  $E_1=156\ 000$  Дж/моль,  $E_2=166\ 400$  Дж/моль,  $E_3=177\ 000$  Дж/моль,  $E_4=160\ 000$  Дж/моль, тепловой эффект реакций  $Q_1=361\ 000$  Дж/моль,  $Q_2=950\ 000$  Дж/моль,  $Q_4=1520$  кДж/моль, объем реактора  $V=10\ \text{м}^3$ , коэффициент теплопередачи  $K_t=2000$  Вт/м<sup>2</sup>\*град, температура хладагента  $T_t=500$  К, абсолютная температура  $T_{\text{вх}}=1200$  К, теплоемкость  $C_t=1200$  Дж/кг\*град, средняя плотность реакционной среды  $\rho = 1,9\ \text{кг/м}^3$ , входная концентрация веществ: метана  $C_{\text{CH}_4\text{вх}} = 13\%$ , кислорода  $C_{\text{O}_2\text{вх}} = 15\%$ , аммиака  $C_{\text{NH}_3\text{вх}} = 12\%$ . Параметры  $5 \leq F \leq 20\ \text{м}^2$  и  $0,01 \leq v_{\text{вх}} \leq 0,2\ \text{м}^3/\text{с}$  значения которых используются для расчета площади теплообмена и объемного расхода реакционной смеси.

Для построения математической модели используем аналитический метод.

#### 3.2 Построение математической модели

При построении математической модели контактный аппарат рассматривается как объект с распределенными координатами, который характеризуется изменением параметров во времени. Целью построения является получение оптимальных значений параметров  $F$  и  $v$ , при которых концентрация синильной кислоты на выходе из реактора будет максимальной.

Структурная схема контактного аппарата представлена на рисунке 3.1.

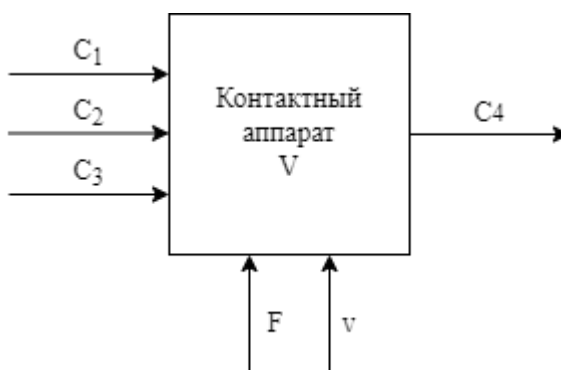
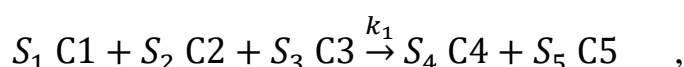


Рисунок 3.1 Структурная схема аппарата.

Как упоминалось ранее, реактор имеет гидродинамический режим – идеальное смешение. Примем следующие допущения при построении математической модели:

- Поток вещества в аппарате движется равномерно;
- Частицы имеют одинаковую скорость и время пребывания в среде;
- Тепловые потери в окружающую среду отсутствуют.

Уравнение химического превращения имеет следующий вид:



где  $C_1$ - концентрация метана,  $C_2$ - концентрация аммиака,  $C_3$  – концентрация кислорода,  $C_4$  – концентрация синильной кислоты,  $C_5$  – концентрация воды,  $S_i$ - стехиометрический коэффициент,  $k$ –константа скорости реакции.

Так как в объекте протекают химические реакции, необходимо составить уравнения формальной кинетики. Система кинетических уравнений:

$$\frac{dC_1}{d\tau} = -2k_1 C_1 C_2 C_3 - k_2 C_1 C_5 - 2k_3 C_1 C_3 + \frac{1}{\tau} (C_{1\text{ВХ}} - C_1);$$

$$\frac{dC_2}{d\tau} = -2k_1 C_1 C_2 C_3 - 4k_4 C_2 C_3 + \frac{1}{\tau} (C_{2\text{ВХ}} - C_2);$$

$$\frac{dC_3}{d\tau} = -3k_1 C_1 C_2 C_3 - k_3 C_1 C_3 - 3k_4 C_2 C_3 + \frac{1}{\tau} (C_{3\text{ВХ}} - C_3);$$

$$\frac{dC_4}{d\tau} = +2k_1 C_1 C_2 C_3 + \frac{1}{\tau} (C_{4\text{ВХ}} - C_4);$$

$$\frac{dC_5}{d\tau} = +6k_1 C_1 C_2 C_3 - k_2 C_1 C_5 + 6k_4 C_2 C_3 + \frac{1}{\tau} (C_{5\text{ВХ}} - C_5),$$



Константа скорости реакции вычисляется по уравнению Аррениуса:

$$k_i = A_i \exp(-E_i / RT).$$

где  $T$  изменяется согласно уравнению теплового баланса с учетом тепловых эффектов экзотермической и эндотермической реакций:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{v(T_{\text{вх}} - T)}{C_t \rho} - \frac{k_t F}{C_t \rho} (T - T_t) + k_1 C_1 C_2 C_3 Q_1 - k_2 C_1 C_5 Q_2 + k_4 C_2 C_3 Q_4,$$

В данной курсовой работе полученная система дифференциальных уравнений решается методом Эйлера – простейший одношаговый метод численного решения задачи Коши. Величины  $C_i$  вычисляются по формуле

$$C_i^{(k+1)} = C_i^k + h * \frac{dT_i(v, F)}{d\tau},$$

где  $k$  – номер итерации,  $h$  – шаг интегрирования (при решении использовался  $h=1$ ).

#### 4. Исследование метода оптимизации

Использование методов математического моделирования применительно к анализу и расчету процесса в химической технологии позволяет выявлять оптимальные условия их проведения.[4] В исходном задании к курсовой работе методом оптимизации указан метод штрафных. Основная идея метода штрафной функции состоит в преобразовании задачи минимизации функции  $z=f(x)$  с соответствующими ограничениями, наложенными на  $x$ , в задачу поиска минимума без ограничений функции  $Z=f(x)+P(x)$ . Функция  $P(x)$  является штрафной.

Исходя из условия задания на поиск максимума концентрации синильной кислоты и построенной математической модели, выбран метод внутренних (барьерных) штрафов. Так как ограничения вида неравенства образовали замкнутую допустимую область.

В методах внутренней точки функция штрафа строится таким образом, чтобы обеспечивалось приближение к решению  $x^*$  внутри допустимой области. В этом случае функция штрафа должна резко возрастать при приближении к

границе допустимой области изнутри, тем самым препятствуя нарушению ограничений. На границе области функция штрафа либо не существует, либо имеет разрыв.

В качестве метода оптимизации был выбран метод покоординатного спуска Гаусса-Зейделя. Метод покоординатного спуска является одним из простейших методов многомерной оптимизации. Суть метода заключается в том, чтобы на каждой итерации по очереди минимизировать функцию вдоль каждой из координат. Таким образом, многомерная задача сводится к одномерной. Преимущество метода в простоте реализации, а недостатками является вычисления длинным путем и трудности при наличии ограничений.

### 5. Оптимизация объекта проектирования

При оптимизации в данной курсовой работе используются выше описанная математическая модель реактора и методы оптимизации. Цель оптимизации – это найти такие параметры  $F$  и  $v$ , при которых концентрация синильной кислоты  $C_4$  будет максимальной. Отрезки локализации изначально получаются из исходного условия, по оси  $F$  [5; 20], по оси  $v$  [0,01; 0,2]. После нахождения новой точки, левая граница отрезка сдвигается в координату найденной оптимальной точки.

Максимальное значение концентрации синильной кислоты достигается при значениях  $F = 5 \text{ м}^2$  и  $v = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ . Максимальное значение концентрации равно  $6.5 \text{ моль}/\text{м}^3$ .

## 6. Проверка работоспособности спроектированного объекта

Для проверки работоспособности математической модели необходимо провести имитационное моделирование – процесс конструирования модели реальной системы и постановки экспериментов на этой модели с целью понять поведение системы или оценить различные стратегии для функционирования данной системы. Другими словами, это метод, позволяющий строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности. Для моделирования системы необходимо поставить искусственный эксперимент, отражающий основные условия ситуации.[7] Для этого нужны два блока: генератор процессов, состоящий из генератора псевдослучайных чисел и фильтра; созданная математическая модель. В данной курсовой на вход математической модели подаются различные значения концентрации метана, полученные в ходе работы генератора процессов, и происходит наблюдение за выходными значениями синильной кислоты.

Генератор псевдослучайных процессов создает набор чисел по линейному конгруэнтному методу распределенных по времени. С помощью заданных значений математического ожидания  $M_0 = 15$  моль/м<sup>3</sup> и корреляционной функции  $K = 12 \exp(-0,1dt)$  происходят фильтрация полученных чисел для того, чтобы они соответствовали модели.

## 7 Практическая реализация. Описание программы.

Для решения поставленной задачи было разработана программа с помощью высокоуровневого языка программирования Python и интегрированной среды разработки JetBrains PyCharm Community Edition 2019.1.3. Пример работы программы можно увидеть в приложении А. Программа состоит из подсистемы визуализации графиков, подсистемы математического расчета: математической и имитационной моделей, процесса оптимизации.

					ТГТУ.09.03.01.019 КР ТЭ-ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		11

### 7.1 Подсистема расчета моделей.

Для получения численных значений математической модели, а также имитационного моделирования в программе присутствуют соответствующие классы.

Функция `math_model` содержит в себе расчеты математической модели, концентраций всех веществ, которые участвуют в образовании итогового продукта – синильной кислоты. В этой же функции осуществляется расчет оптимальных значений для  $F$  и  $v$ . Блок-Схема работы метода оптимизации представлена в приложении Б.

Данные, полученные после оптимизации, отправляются в метод `lab_6`. В этом методе реализовано имитационное моделирование. Для его работы нужны оптимальные параметры, полученные на выходе процесса оптимизации. Результатом работы метода является построение графиков соответствующих заданию: входная концентрация метана –  $C_1$ , выходная концентрация синильной кислоты –  $C_4$ .

### 7.2 Подсистема визуализации графиков

Для наглядного представления полученных данных используется встроенная библиотека `pylab`. Использование данной библиотеки значительно упрощает процесс визуализации двумерных графиков.

Используя построение линий, точек и текста по координатам операторы данной библиотеки строят координатные оси и сами графики. Размер графика автомасштабируются в зависимости от минимальных и максимальных значений по каждой из осей. Так же график можно перемещать, что бы увидеть его полностью или отдельные его части.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения задания курсовой работы был разработан программный продукт, программный код которого представлен в приложении В. В нем представлена модель контактного аппарата по производству синильной кислоты. Были изучены или закреплены знания по математическому моделированию технологических процессов, оптимизационные методы, а также проверка работоспособности модели с помощью имитационного моделирования.

На основе данных, которые получились при работе программы, можно сделать вывод о том, что подача на вход столь малого количества входных веществ не способна повлиять на работу аппарата объемом  $10 \text{ м}^3$ .

					<i>ТГТУ.09.03.01.019 КР ТЭ-ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		13

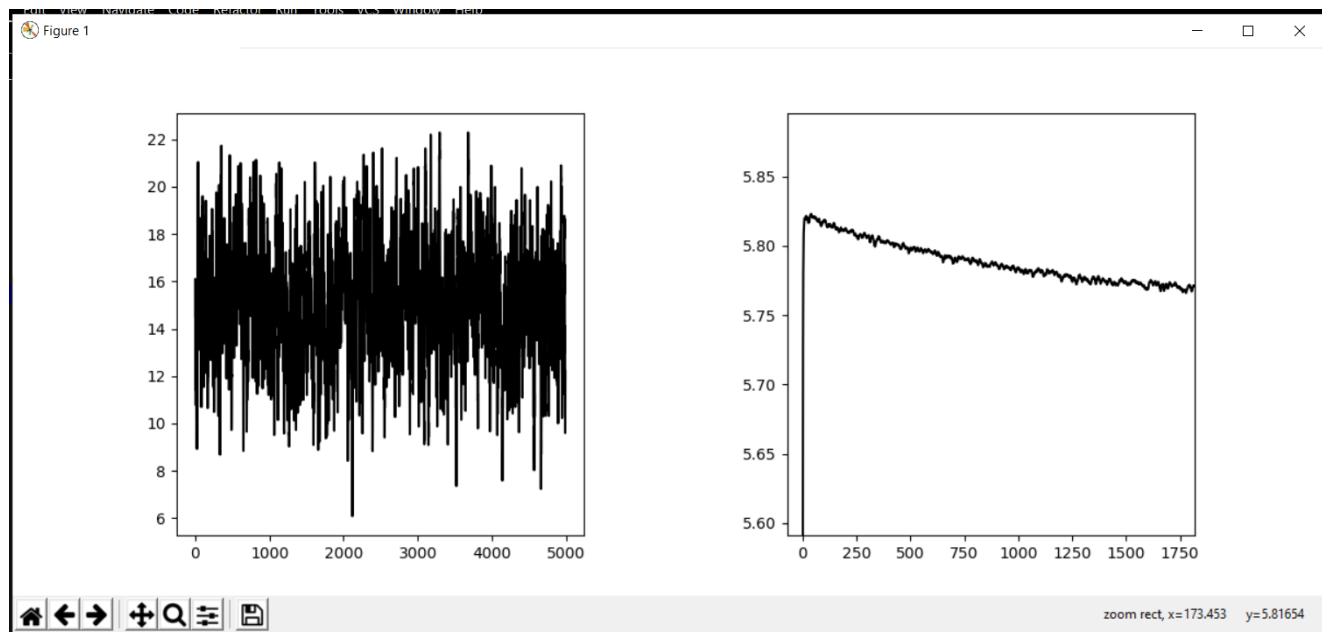
## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Общая химическая технология: в 2 ч. / под ред И.П. Мухленова. – М. : Высшая школа, 1984. – Ч. 2. – 264 с.
2. Ровкина Н.М., Ляпков А.А. Технологические расчеты в процессах синтеза полимеров. — Сборник примеров и задач. — Томск:Изд-во ТПУ, 2004. — 167 с.
3. Закгейм А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А.Ю. Закгейм. – М. : Химия, 1982. – 288 с.
4. Математическое моделирование химико-технологических процессов: учебное пособие / Н.В. Ушева, О.Е. Мойзес, О.Е. Митянина, Е.А. Кузьменко; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 135 с.
5. Литовка, Ю.В.Получение оптимальных проектных решений и их анализ с использованием математических моделей :учебное пособие /Ю.В. Литовка. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. –160 с.
6. Бояринов А.И. Методы оптимизации в химической технологии / А.И. Бояринов, В.В. Кафаров. – М. : Химия, 1975. – 500 с
7. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука / М.:Мир, 1978. – 420с.
8. Васильев, С. А. В191 Компьютерная графика и геометрическое моделирование в информационных системах [Электронный ресурс] / С. А. Васильев, И. В. Милованов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 80 с.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

## Примеры работы программы



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ТГТУ.09.03.01.019 КР ТЭ-ПЗ

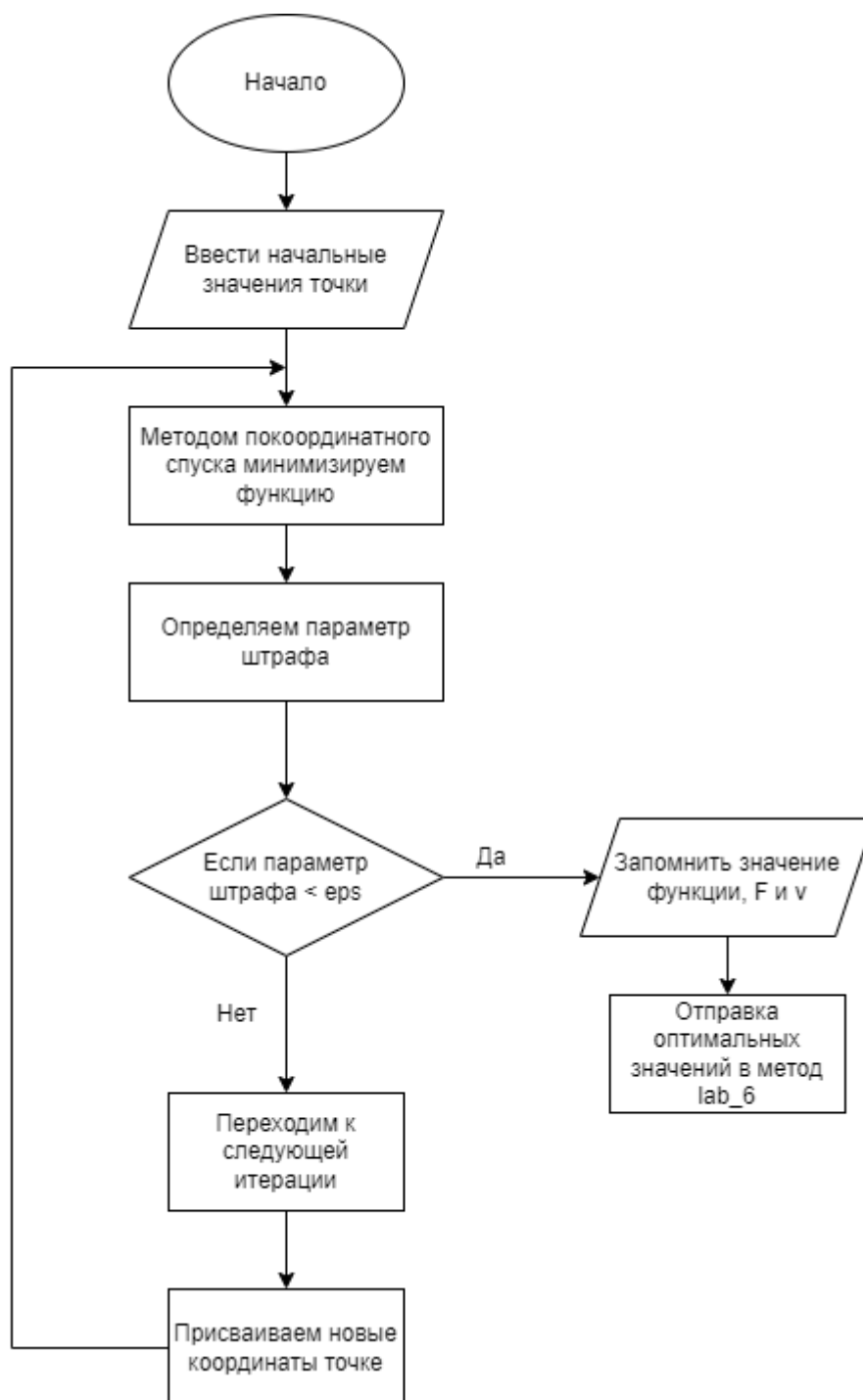
Лист

15

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

## Блок-схема алгоритма оптимизации





## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

## Распечатка программных модулей

```

import pylab
import math
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def lab_6():
    lam1 = 5 ** 12
    lam2 = 3 ** 11
    M0 = 15
    disp0 = 12
    alpha0 = -0.1
    N = 5000
    Ns = 10

    x = [1]
    xi = []
    for j in range(N):
        x.append(((lam1 * x[j]) % lam2))
        xi.append(x[j] / lam2 - 0.5)

    Mx = 1 / N * sum(xi)
    peremen = 0
    for j in range(N):
        peremen += (xi[j] - Mx) ** 2
    dispx = 1 / N * peremen

    # print(Mx)
    # print(dispx)

    z = []
    for k in range(1, N - 9):
        j = 0
        for i in np.arange(k, k + Ns):
            j += xi[i] * np.sqrt(disp0 / (dispx * -alpha0)) * np.exp(alpha0 * (i -
k)) + M0
        z.append(1 / Ns * j)

    x1 = [i for i in range(N)]
    z1 = [i for i in range(N - 10)]
    return z1, z, z[0]
def math_model(F=5, v=0.01):
    z1, Z_k, C1_vh = lab_6()
    A_1 = 10000
    E_1 = 156000
    A_2 = 20000
    E_2 = 166400
    A_3 = 50000
    E_3 = 177000

```

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

ТГТУ.09.03.01.019 КР ТЭ-ПЗ

Лист

17

```
A_4 = 500
E_4 = 160000
```

```
K_t = 2000
T_t = 500
V = 10
T_vh = 1200
```

```
Q_1 = 361000
Q_2 = 950000
Q_4 = 1520000
```

```
C_t = 1200
p = 1.9
R = 8.31
```

```
C1_vh = (13 * p) / (100 * (16 / 1000))
C3_vh = (15 * p) / (100 * (32 / 1000))
C2_vh = (12 * p) / (100 * (17 / 1000))
```

```
k1 = lambda TT: A_1 * np.exp((-E_1) / (R * TT))
k2 = lambda TT: A_2 * np.exp((-E_2) / (R * TT))
k3 = lambda TT: A_3 * np.exp((-E_3) / (R * TT))
k4 = lambda TT: A_4 * np.exp((-E_4) / (R * TT))
```

```
tau = v / V
d_t = 1
eps = 0.001
```

```
d_C4 = lambda C1, C2, C3, C4, t: 2 * k1(t) * C1 * C2 * C3 + tau * (- C4)
d_C1 = lambda C1, C2, C3, C5, t: -2 * k1(t) * C1 * C2 * C3 - k2(t) * C1 * C5 -
2 * k3(t) * C1 * C3 + tau * (
    C1_vh - C1)
d_C2 = lambda C1, C2, C3, t: -2 * k1(t) * C1 * C2 * C3 - 4 * k4(t) * C2 * C3 +
tau * (C2_vh - C2)
d_C3 = lambda C1, C2, C3, t: -3 * k1(t) * C1 * C2 * C3 - k3(t) * C1 * C3 - 3 *
k4(t) * C2 * C3 + tau * (
    C3_vh - C3)
d_C5 = lambda C1, C2, C3, C5, t: 6 * k1(t) * C1 * C2 * C3 - k2(t) * C1 * C5 +
6 * k4(t) * C2 * C3 + tau * (-C5)
```

```
d_T = lambda d_C1, d_C2, d_C3, d_C5, T: (((v / V) * (T_vh - T)) / (C_t * p)) -
((K_t * F) / (C_t * V * p)) * (
    T - T_t) + ((k1(T) * d_C1 * d_C2 * d_C3 * Q_1)) + ((k4(T) * d_C2 *
d_C3 * Q_4)) - (k2(T) * d_C1 * d_C5 * Q_2)
```

```
T_h = [T_vh]
```

```
res_1 = Z_k
res_2 = [C2_vh]
res_3 = [C3_vh]
res_4 = [0]
res_5 = [0]
Time = [0]
```

```

count1 = -1
#print(F,v)
while True:
    count1 += 1
    res_4.append(res_4[-1] + (d_C4(res_1[count1], res_2[-1], res_3[-1],
res_4[-1], T_hren[-1]) * d_t))
    #res_1.append(res_1[-1] + (d_C1(res_1[-1], res_2[-1], res_3[-1], res_5[-
1], T_h[-1]) * d_t))
    res_2.append(res_2[-1] + (d_C2(res_1[count1], res_2[-1], res_3[-1], T_h[-
1]) * d_t))
    res_3.append(res_3[-1] + (d_C3(res_1[count1], res_2[-2], res_3[-1], T_h[-
1]) * d_t))
    res_5.append(res_5[-1] + (d_C5(res_1[count1], res_2[-2], res_3[-2],
res_5[-1], T_h [-1]) * d_t))

    T_hren.append(T_h [-1] + d_T(res_1[count1], res_2[-2], res_3[-2], res_5[-
2], T_hren[-1])*d_t)
    #print(T_h [-1])
    #print(res_1[count1], res_2[-1], res_3[-1], res_4[-1], res_5[-1], T_h [-
1])

    Time.append(Time[-1] + d_t)
    if count1 == res_1.index(res_1[-1]):
        return Time, z1, res_1, res_2, res_3, res_4, res_5
    # if (abs(res_1[-2] - res_1[-1]) < eps) & (abs(res_2[-2] - res_2[-1]) <
eps) & (
    #         abs(res_3[-2] - res_3[-1]) < eps) & (abs(res_4[-2] - res_4[-1])
< eps) & (
    #         abs(res_5[-2] - res_5[-1]) < eps):
    #     #print(count1)
    #     return res_4[-1]
Time, z1, res_1, res_2, res_3, res_4, res_5 = math_model()
fig, axes = pylab.subplots(nrows=1, ncols=2, figsize=(12, 5))
axes[0].plot(z1, res_1, color='black')
# axes[2].plot(Time, res_2, color='black')
# axes[3].plot(Time, res_3, color='black')

axes[1].plot(Time, res_4, color='black')
# axes[4].plot(Time, res_5, color='black')
#print(res_4)

pylab.subplots_adjust(wspace=0.5, hspace=0)
pylab.show()          g.cordsLine();
g.drawGraph(getListLCpoT0T1(t0, t1));    }
}
}

```