

**На правах рукописи**

**АФАНАСЕНКО Алексей Геннадьевич**

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КАРБОНИЗАЦИИ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ  
ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ**

**05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (в промышленности)**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа 2008**

Работа выполнена на кафедре автоматизации химико-технологических  
процессов  
Уфимского государственного нефтяного технического университета

**Научный руководитель** д-р техн. наук, проф.  
**ВЕРЁВКИН Александр Павлович**

**Официальные оппоненты** д-р техн. наук, проф.  
**ЛЮТОВ Алексей Германович**

канд. техн. наук, доц.  
**МУРАВЬЁВА Елена Александровна**

**Ведущая организация** **ОАО Стерлитамакский нефтехимический завод**

Защита диссертации состоится 23 декабря 2008 г. В 10 часов  
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03  
при Уфимском государственном авиационном техническом университете  
по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета

Автореферат разослан «    » ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, проф.

**В.В. Миронов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Процесс карбонизации является основным процессом в производстве кальцинированной соды и его протекание оказывает значительное влияние на технико-экономические показатели содового производства в целом.

Целью оптимизации управления процесса карбонизации является максимальное использование натрийсодержащего сырья и двуокси углерода, обеспечение требуемого качества гранулометрического состава кристаллов бикарбоната натрия (однородность по размеру 100–200 мкм).

В настоящее время отсутствуют методы автоматического управления процессом карбонизации по показателям качества (ПК): степени использования натрия и содержанию связанного аммиака в выходящей из карбонизационной колонны суспензии. Поэтому управление технологическим процессом с целью поддержания требуемых ПК осуществляется оператором вручную по результатам лабораторных анализов путем регулирования температур, давлений, расходов потоков с помощью локальных АСР.

Сложность управления данным технологическим процессом осложняется тем, что механизм процесса карбонизации, в котором имеют место обратимые реакции, до настоящего времени окончательно не выяснен. Химический реактор (карбонизационная колонна) представляет собой многомерный объект управления, в котором не все параметры могут быть измерены в оперативном режиме.

Управление процессом карбонизации с помощью локальных АСР по поддержанию барометрического и температурного режима без учёта ПК продуктов приводит к неэффективному использованию сырья, чрезмерным затратам тепловой энергии.

С учётом сложности процесса карбонизации, необходимости вычисления ПК и оптимизации режимов становится очевидным, что система управления должна базироваться на математической модели процесса.

При решении задач моделирования и управления процессом карбонизации в содовой промышленности автор опирался на труды В.В. Кафарова, Г.М. Островского, Ю.М. Волина, Л.С. Понтрягина, В.П. Мешалкина, Д.А. Поспелова, С.И. Спивака, Г.Г. Куликова, А.П. Веревкина и других ученых.

Задача оперативного управления по показателям качества продуктов многоступенчатого процесса карбонизации с обратимыми реакциями является весьма *актуальной научной задачей*, а ее решение позволит повысить эффективность всего производства кальцинированной соды.

**Цель диссертационной работы** состоит в разработке методов оперативного управления и методик практической реализации автоматизированных систем управления процессом карбонизации аммонизированного рассола по показателям качества продуктов.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику, на основе которой разрабатывается система моделирования и управления процессом карбонизации.

2. Разработать математическую модель для предварительного изучения процесса с целью анализа и отыскания оптимальных режимов и модель для оперативного определения показателей качества продукции для целей поддержания режимов, близких к оптимальным, полученным на этапе предварительного изучения процесса.

3. Выявить основные возмущающие факторы с использованием тепловых балансов реактора и разработать методы и алгоритмы поиска оптимальных режимов.

4. Разработать систему управления по показателям качества продуктов, реализующую оптимальное управление с компенсацией возмущений внешней среды и параметров технологического процесса и исследовать ее эффективность.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач использовались методы системного анализа, теории управления, теории имитационного моделирования, теории нейронных сетей.

#### **На защиту выносятся**

1. Методика построения АСУ ТП процесса карбонизации, базирующаяся на математической модели процесса и расчётных значениях показателей качества.

2. Математическая модель и результаты оптимизации процесса карбонизации по технико-экономическим критериям с учётом показателей качества продукции и основных возмущающих факторов.

3. Методика моделирования для определения не измеряемых оперативно показателей качества процесса карбонизации по измеряемым и управляющим параметрам и модель, базирующаяся на использовании нейронных сетей.

4. Структура системы управления по показателям качества продуктов, реализующая оптимальное управление с компенсацией возмущений внешней среды и параметров технологического процесса, и оценка эффективности разработанной АСУТП.

### **Научная новизна работы**

Научную новизну работы определяют следующие результаты:

1. Методика построения АСУТП, которая отличается тем, что на основе моделирования оперативно поддерживаются заданные показатели качества продуктов и обеспечиваются близкие к оптимальным в смысле технико-экономических критериев технологические режимы.

2. Метод моделирования, базирующийся на уравнениях кинетики химических реакций, и метод оптимизации режимов процесса карбонизации по высоте реактора на основе модели, а также программное обеспечение для решения данных задач.

3. Методика и модель для определения не измеряемых оперативно показателей качества процесса карбонизации по измеряемым и управляющим параметрам с помощью искусственных нейронных сетей. В соответствии с методикой по экспериментальным данным могут быть найдены коэффициенты связей между нейронами сети, которые реализуют зависимость между входными данными для сети (параметры сырьевых потоков: температура, расход, давление и т.д.) и выходными данными (показатели качества процесса карбонизации).

4. Структура разработанной АСУТП реактора карбонизации, обеспечивающая близкие к оптимальным в смысле технико-экономических критериев технологические режимы.

### **Практическая ценность результатов работы**

Практическая ценность проводимой научной работы заключается в следующем:

1. Разработана программа для ЭВМ (свидетельство о регистрации в Роспатенте №2008610163), которая позволяет рассчитывать оптимальный температурный режим процесса карбонизации, концентрации компонентов реакционной смеси по высоте колонны в зависимости от критерия оптимальности. Программное обеспечение можно применять как в производственных условиях для расчёта выхода целевого продукта при изменившихся концентрациях сырьевых потоков, так и в научных исследованиях для расчёта предельных показателей процесса карбонизации.

2. Разработана система по определению показателей качества процесса карбонизации на основе измеряемых параметров. Система позволяет определять в on-line режиме по измеряемым параметрам технологического процесса показатели качества продукции. Система по определению показателей качества процесса карбонизации защищена патентом на полезную модель (патент

№200873324, дата публикации 20.05.2008) и внедрена на производстве кальцинированной соды ОАО «Сода» (г. Стерлитамак).

3. Полученные функциональные зависимости влияния возмущающих факторов на тепловой режим процесса карбонизации позволяют поддерживать близкий к оптимальному температурный режим в карбонизационной колонне.

4. Разработана система управления технологическим процессом карбонизации по показателям качества продукции, которая позволяет снизить потребление сырья. Элемент системы управления процессом карбонизации – система по управлению отбором суспензии из карбонизационной колонны защищен патентом на полезную модель (патент №200870881, дата публикации 20.02.2008). Предложенная автоматизированная система управления может быть реализована на большинстве серийно выпускаемых микроконтроллеров.

### **Связь исследований с научными программами**

Работа проводилась в рамках целевой федеральной программы «Национальная технологическая база» на 2007-2011 годы и программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007-2012 годы.

### **Апробация работы**

Основные результаты и положения данной диссертационной работы обсуждались на:

- 12-й международной конференции и выставке «Управление производством в системе Trace Mode» Москва, 2006 г.
- всероссийской научно-технической конференции «Информационные системы и модели в научных исследованиях, промышленности и экологии» г. Тула, 2007 г.
- 8-ой всероссийской научно-практической конференции аспирантов и студентов «Химия и химическая технология в XXI веке» г. Томск, 2007 г.
- 4-ой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» Санкт-Петербург, 2007 г.
- 4-ой международной научно-практической конференции «Динамика исследования-2008» г. София (Болгария), 2008 г.
- 4-ой международной научно-практической конференции «Глобальный научный потенциал» г. Тамбов, 2008 г.

## **Публикации**

В рамках проводимой научной работы опубликовано 15 печатных работ: 5 статей, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 7 статей в трудах конференции, 2 патента на полезную модель, 1 программа для ЭВМ.

## **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, включая 37 рисунков, 14 таблиц и библиографию, содержащую 84 названия.

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы основные цели исследований, определены основные трудности в выборе режимных параметров управления карбонизационной колонной. Во введении описано содержание разделов, приведены основные положения, выносимые на защиту, практические результаты исследований.

**В первой главе** выявлены основные особенности управления процессом карбонизации аммонизированного рассола, описаны цели и критерии качества данного процесса. Выполнен анализ задач и методов управления процессом карбонизации.

В настоящее время управление процессом карбонизации осуществляется с помощью локальных автоматических систем регулирования: управление отбором суспензии из карбонизационной колонны, регулирование температуры, выходящей из карбонизационной колонны суспензии, регулирование уровня в карбонизационной колонне, поддержание заданной степени предварительной карбонизации. Так как локальные автоматические системы регулирования не позволяют эффективно управлять процессом карбонизации, предложено вести разработку системы управления на основе использования математической модели процесса. Показано, что разработанные ранее математические модели процесса карбонизации аммонизированного рассола не объясняют многие качественные и количественные явления в ходе протекания химических процессов. В реакторе (карбонизационной колонне) непрерывного типа концентрация каждого реагента в результате химических превращений значительно изменяется в каждом сечении. Предложено разработать две модели. Кинетическую (неформальную), которая используется на этапе предварительного изучения процесса для целей анализа и отыскания оптимальных режимов. Нейросетевую (формальную), которая используется для оперативного определения показателей качества продукции для целей поддержания режимов, близких к опти-

мальным, полученным на этапе предварительного изучения процесса. Кинетическая модель учитывает неопределенность состава реакционной смеси.

**Вторая глава** посвящена разработке неформальной математической модели для целей изучения качественных и количественных взаимосвязей концентраций реагентов на выходе из реактора в зависимости от концентрации входящих компонентов и температуры протекания реакций процесса карбонизации. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, составленных на основании уравнений материального и теплового баланса.

*Неформальные математические модели* основываются на теоретическом анализе физико-химических процессов, протекающих в технологическом аппарате. Такие математические модели технологических аппаратов учитывают: скорости химических реакций, теплообмен, диффузии, уравнения материального/теплового баланса и фазовых превращений. Данный подход в математическом моделировании имеет ряд преимуществ. Эти модели объясняют качественные и количественные изменения в ходе протекания химических реакций, и позволяют определить их предельные показатели, позволяют учитывать изменение числа молей реакционной газовой смеси и инвариантны к изменению условий теплообмена, позволяют решать обратные кинетические задачи, т.е. определять численные значения кинетических и адсорбционных параметров. Знание механизма процесса карбонизации аммонизированного рассола позволит описать скорость химической реакции уравнениями, на основе которых можно рассчитать оптимальные режимные параметры реактора.

Однако при разработке неформальных математических моделей приходится использовать некоторые допущения. По этой причине результаты моделирования могут существенно отличаться от реально наблюдаемых. Кроме того, разработке неформальной модели предшествует этап экспериментального исследования технологических процессов в лабораторных условиях с целью определения констант скоростей химических реакций, энергии активации, коэффициентов тепло- и массообмена и т.д. Уравнения математических моделей, как правило, нелинейны, поэтому нахождение даже их приближенных решений часто осуществляется с использованием и применением численных методов на ЭВМ. Такие вычисления требуют значительной информационной мощности ЭВМ и времени. Эти обстоятельства затрудняют использование неформальных математических моделей для целей оперативного управления.

Разработана следующая неформальная модель.

Согласно закону действующих масс и матрицы стехиометрических коэффициентов, кинетические уравнения, соответствующие схеме химических



превращений для процесса карбонизации аммонизированного рассола можно выразить уравнениями

$$\begin{aligned}\omega_1(C, T) &= k_1(T)C_1; \\ \omega_2(C, T) &= k_2(T)C_1^2C_4 - k_5(T)C_3C_5; \\ \omega_3(C, T) &= k_3(T)C_5C_4C_3 - k_6(T)C_6^2; \\ \omega_4(C, T) &= k_4(T)C_6C_7 - k_7(T)C_8C_9.\end{aligned}\tag{1}$$

где  $C$  – вектор мольных концентраций веществ, моль/м<sup>3</sup>;

$\omega_j(C, T)$  – скорость  $j$ -ой стадии,  $j = \overline{1, 4}$ , м<sup>3</sup>/час;

$k_s(T)$  – константы скоростей,  $s = \overline{1, 7}$ , (м<sup>3</sup>/моль)<sup>1-d</sup>·ч<sup>-1</sup>;

$d$  – порядок реакции,  $d = \overline{1, 3}$ .

Исходя из уравнения Аррениуса

$$k_s(T) = k_s^0 e^{-\frac{E_s}{RT}},$$

где  $k_s^0$  – предэкспоненциальный множитель;

$E_s$  – энергия активации стадии, кал/моль;

$T$  – абсолютная температура, К;

$R$  – универсальная газовая постоянная кал/ (моль·К).

Показано, что последняя строка матрицы стехиометрических коэффициентов ненулевая, следовательно, реакции протекают с изменением числа молей. Это учитывается при разработке математической модели исследуемого процесса.

Поскольку суммарная концентрация  $C = \sum_{i=1}^9 C_i$  изменяется по длине карбонизационной колонны, то уравнения материального баланса, с начальными условиями  $x_i(0) = x_i^0$ ,  $i = \overline{1, 9}$ ;  $C(0) = C_0$  будет иметь вид

$$\frac{v}{S} \frac{dC_i}{dl} = \sum_{j=1}^5 v_{ij} \omega_j(C, T), \quad i = \overline{1, 9}$$

или

$$\frac{v}{S} \frac{dCx_i}{dl} = \sum_{j=1}^5 v_{ij} \omega_j(C, T), \quad i = \overline{1, 9}\tag{2}$$

где  $x_i = \frac{C_i}{C}$  – концентрация  $i$ -го компонента в мольных долях;

$v$  – скорость потока в карбонизационной колонне, м<sup>3</sup>/час;

$S$  – площадь поперечного сечения карбонизационной колонны, м<sup>2</sup>;

$l$  – длина карбонизационной колонны, м.

Систему уравнения (2) замыкает условие нормировки по компонентам

$$\sum_{i=1}^9 x_i = 1.$$

Начальная суммарная концентрация  $C_0$  постоянна при любых температурах. Тогда, разделив (2) на  $C_0$ , получим систему дифференциальных уравнений

$$\frac{\nu}{S} \frac{dNx_i}{dl} = \sum_{j=1}^4 \nu_{ij} W_j(\mathbf{x}, T), \quad i = \overline{1,9}, \quad (3)$$

где  $N = \frac{C}{C_0}$  – относительное изменение числа молей реакционной среды;

$W = \frac{\omega_j}{C_0}$  – приведённые скорости химических реакций, 1/ч.

Обозначим

$$F_i = \sum_{j=1}^4 \nu_{ij} W_j, \quad i = \overline{1,9}, \quad (4)$$

Преобразовав систему уравнений (4) с учетом условий нормировки (3), получим кинетическую модель вида

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dl} &= \frac{S}{\nu} \frac{F_i - x_i F_n}{N}, \quad i = \overline{1,9} \\ \frac{\nu dN}{S dl} &= \frac{S}{\nu} F_n \end{aligned} \quad (5)$$

с начальными условиями

$$x_i(0) = x_i^0, \quad i = \overline{1,9}; \quad N(0) = 1. \quad (6)$$

Функции  $F_n, F_i, i = \overline{1,9}$  с учетом стехиометрических коэффициентов примут вид

$$\begin{aligned} F_1(x, T) &= -W_1(x, T) - 2W_2(x, T); \\ F_2(x, T) &= W_1(x, T); \\ F_3(x, T) &= W_1(x, T) + W_2(x, T) + W_3(x, T); \\ F_4(x, T) &= -W_2(x, T) - W_3(x, T); \\ F_5(x, T) &= W_2(x, T) - W_3(x, T); \\ F_6(x, T) &= 2W_3(x, T) - W_4(x, T); \\ F_7(x, T) &= -W_4(x, T); \\ F_8(x, T) &= W_4(x, T); \\ F_9(x, T) &= W_4(x, T); \\ F_n(x, T) &= W_1(x, T) - W_2(x, T) - W_3(x, T). \end{aligned}$$

Проверка адекватности кинетической модели процесса карбонизации показала, что максимальная относительная погрешность моделирования качественного состава сырьевых потоков не превышает 5% по сравнению с лабораторными анализами, средняя погрешность 3,7%.

Для решения *задачи оптимизации*, необходимо определить температурный режим процесса карбонизации, при котором обеспечивается максимальный выход гидрокарбоната натрия (или с учётом обозначений продукт  $X_8$ ).

Критерий оптимальности  $R$  будет иметь вид

$$R = X_8 \rightarrow \max \quad (7)$$

Из технологических соображений на температуру накладываются ограничения

$$28 \text{ C}^0 \leq T \leq 65 \text{ C}^0 \quad (8)$$

Сведем задачу максимизации значения  $X_8(l_k)$  к минимизации функционала

$$I = \int_0^{l_k} \varphi_0(\mathbf{x}, T) dt \quad (9)$$

где

$$\varphi_0(\mathbf{x}, T) = -\frac{dx_8}{dl} = -\frac{S}{v} \frac{F_8 - x_8 F_n}{x_{10}}$$

Задача поиска оптимального температурного режима (5)-(9) решается с помощью принципа максимума Понтрягина. Принцип максимума для процессов, описываемых дифференциальными уравнениями, является достаточным условием оптимальности. Поэтому дополнительной проверки на оптимум получаемых решений не требуется. Для нахождения оптимальной температуры по длине карбонизационной колонне используем условие максимума для функции Понтрягина  $H$  (гамильтониан)

$$H = \sum_{i=1}^{10} \lambda_i \varphi_i(\mathbf{x}, T) = \frac{S}{v} \left( \sum_{i=1}^9 \lambda_i \frac{F_i - x_i F_n}{x_{10}} + \lambda_{10} F_{10} \right) \quad (10)$$

где  $\varphi_i(x, T)$ ,  $i = \overline{1,10}$  – правые части системы уравнений (5);

$\varphi_0(x, T)$  – подынтегральная функция критерия оптимальности, выраженного в интегральной форме.

Функции  $\lambda_i(l)$  удовлетворяют системе сопряженных уравнений

$$\frac{d\lambda_i}{dl} = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad i = \overline{1,10} \quad (11)$$

Недостающие граничные условия получаются заданием конечных значений для функций  $\lambda_i(l)$ , найденных с учетом условий трансверсальности по следующему правилу

$$\lambda_i(l_k) + \lambda_0 \frac{\partial R}{\partial x_i} = 0, \quad \overline{i = 1,10} \quad (12)$$

Таким образом, принцип максимума Понтрягина сводит решение задачи оптимального управления к решению двухточечной краевой задаче для системы основных и сопряжённых уравнений (5), (11) с заданными ограничениями (6), (12) в начальной  $l=0$  и конечной точке  $l=l_k$ .

Так как правые части дифференциальных уравнений описания оптимизируемого процесса достаточно сложные, найти аналитическое решение чрезвычайно трудно. Вследствие этого невозможно отыскание общих интегралов систем уравнений, характеризующих переменными  $x_i(l)$ ,  $\lambda_i(l)$  по всей длине реактора. Наиболее целесообразным представляется применение численных методов интегрирования системы уравнений. Система дифференциальных уравнений решена с помощью метода последовательных приближений.

**Для целей оперативного определения параметров** технологического режима удобно использовать формальные математические модели. При этом структура и параметры модели выводятся не из физических представлений о процессе, а путём отыскания наилучшей аппроксимации функциональных зависимостей выходных переменных от входных.

Показано, что в качестве формальных моделей эффективно использование *нейросетевого моделирования* показателей качества.

Выбраны и обоснованы технологические параметры, которые оказывают наибольшее влияние показатели качества процесса карбонизации. Обоснован тип и архитектура сети. Путем экспериментального подбора сделан выбор сети на основе показателей эффективности обучения – интегральной ошибки. Предлагается применить в качестве нейросетевой модели показателей качества процесса карбонизации ИНС с обратным распространением ошибки с сигмоидальными функциями активации скрытого и выходного слоя, с численностью нейронов скрытым слое – 6 и количеством эпох обучения – 40.

Проверка адекватности нейросетевой модели показателей качества процесса карбонизации показала, что максимальная относительная погрешность моделирования качественного состава сырьевых потоков не превышает 1% по сравнению с лабораторными анализами, средняя погрешность 0,76%.

**В третьей главе** через анализ тепловых эффектов и тепловых балансов процесса выявлены возмущающие факторы, которые определены в зависимости от расходов входящих и выходящих потоков в карбонизационную колонну. Параметры технологического процесса обладают существенным взаимным влиянием. При разработке системы управления исследовался вопрос о целесообразности и возможности компенсации перекрёстных связей технологических параметров в окрестности оптимальных режимов. Получены передаточные функции каналов передачи воздействий в объекте в виде передаточных функ-

ций. Для «развязки» каналов технологического объекта управления рассчитаны передаточные функции динамических и статических компенсаторов перекрёстных связей. С учётом специфичных особенностей решения задачи управления процессом карбонизации аммонизированного рассола, предлагается применение структуры системы автоматического управления, приведённой на рисунке 1.

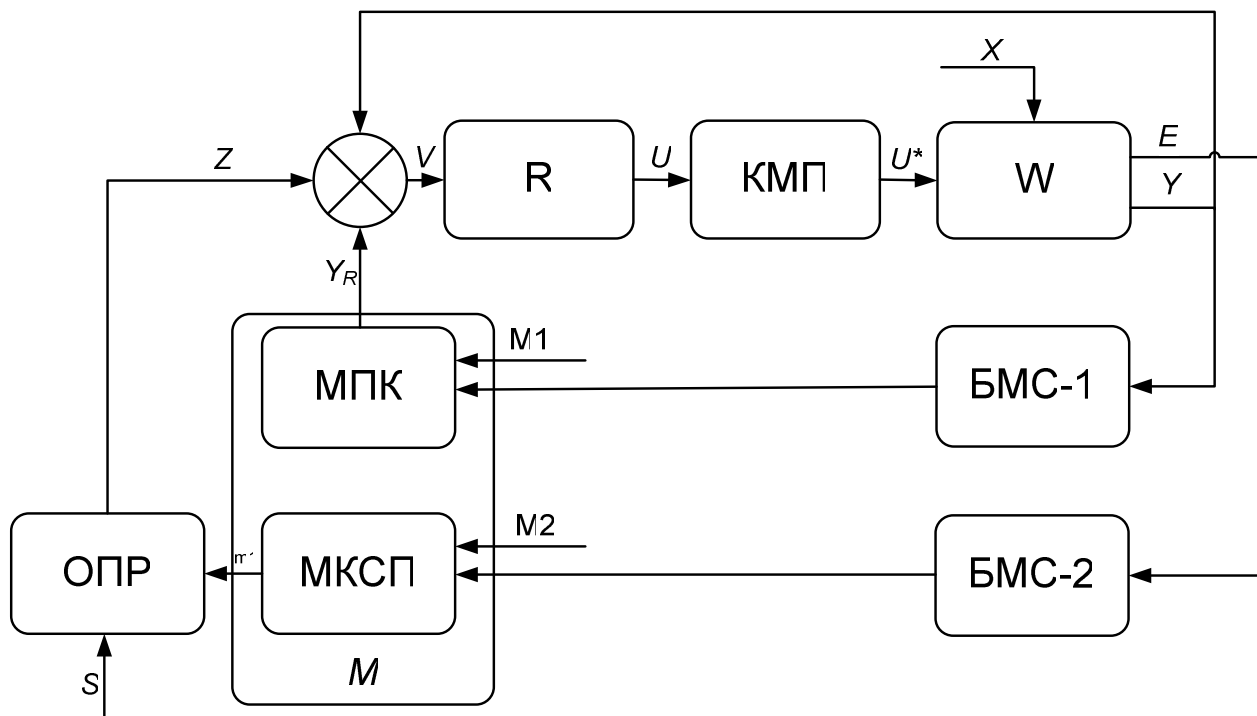


Рисунок 1 – Структура системы управления процессом карбонизации

Где

$W$  – технологический объект управления;

$R$  – регуляторы (исполнительные механизмы);

$M$  – математическая модель;

БМС-1 – блок масштабирования сигналов для модуля моделирования качества сырьевых потоков;

БМС-2 – блок масштабирования сигналов для модуля моделирования показателей качества процесса;

МКСП – модуль моделирования качества сырьевых потоков;

МПК – модуль моделирования показателей качества процесса;

КМП – блок компенсации перекрёстных связей;

ОПР – блок оптимизации процесса карбонизации.

Векторы воздействия:

$U^*$  – вектор управляющих воздействий с компенсацией перекрёстных связей;

$U$  – вектор управляющих воздействий без компенсации перекрёстных связей;

$X$  – вектор оперативно измеренных технологических параметров (входных материальных потоков для реактора);

$Y$  – вектор оперативно измеренных технологических параметров (выходных материальных потоков для реактора);

$Y_R$  – вектор моделируемых управляющих воздействий;

$Z$  – вектор оптимизирующих воздействий на задания регуляторов;

$V$  – вектор заданий для АСР нижнего уровня;

$S$  – вектор ограничения максимальных и минимальных значений технологических параметров;

$E$  – вектор параметров, измеряемых лабораторным способом (выходных материальных потоков для реактора);

$M1$  – вектор корректировки и ручной настройки модуля моделирования качества сырьевых потоков.

$M2$  – вектор корректировки и ручной настройки модуля моделирования показателей качества процесса.

Измеренные значения технологических параметров объекта  $W$  в виде вектора  $\bar{Y}$  подаются через блоки масштабирования сигналов **БМС** в математическую модель процесса карбонизации  $M$ . Математическая модель  $M$  состоит из двух модулей. Один модуль на основе законов химической кинетики моделирует качество выходящих из реактора сырьевых потоков в зависимости от состава входящих реагентов. Другой модуль на основе приборно-измеряемых технологических параметров процесса моделирует в оперативном режиме его ПК. **БМС-1** формирует сигнал для модуля моделирования качества сырьевых потоков **МКСП**, а **БМС-2** – для модуля моделирования показателей качества технологического процесса. Данные с МКСП поступают на блок оптимизации процесса **ОПР**, в котором рассчитываются оптимальные температурные режимы процесса для целей максимального выхода гидрокарбоната натрия. На режимные параметры накладываются технологические ограничения в виде вектора  $S$ . Задания (уставки) для локальных АСР нижнего уровня  $V$  для блока регуляторов  $R$  формируются векторами  $Z$  и  $Y_R$ . Вектор управляющих воздействий  $U$  подаётся на блок компенсации перекрёстных связей (диагонализатор) технологических параметров **КМП**, в котором осуществляется «развязка» каналов управления. Вектор управлений  $U^*$ , учитывающий «развязку» каналов, воздействуют на технологический объект управления  $W$ . Корректировка, ручная настройка и обучение модулей моделирования качества сырьевых потоков и моделирования показателей качества процесса, производится по основе векторов  $M1$  и  $M2$ , а также по данным вектора  $Y$  в непрерывном режиме.

На рисунке 2 представлена структурная схема блока компенсации перекрёстных связей (**КМП**).

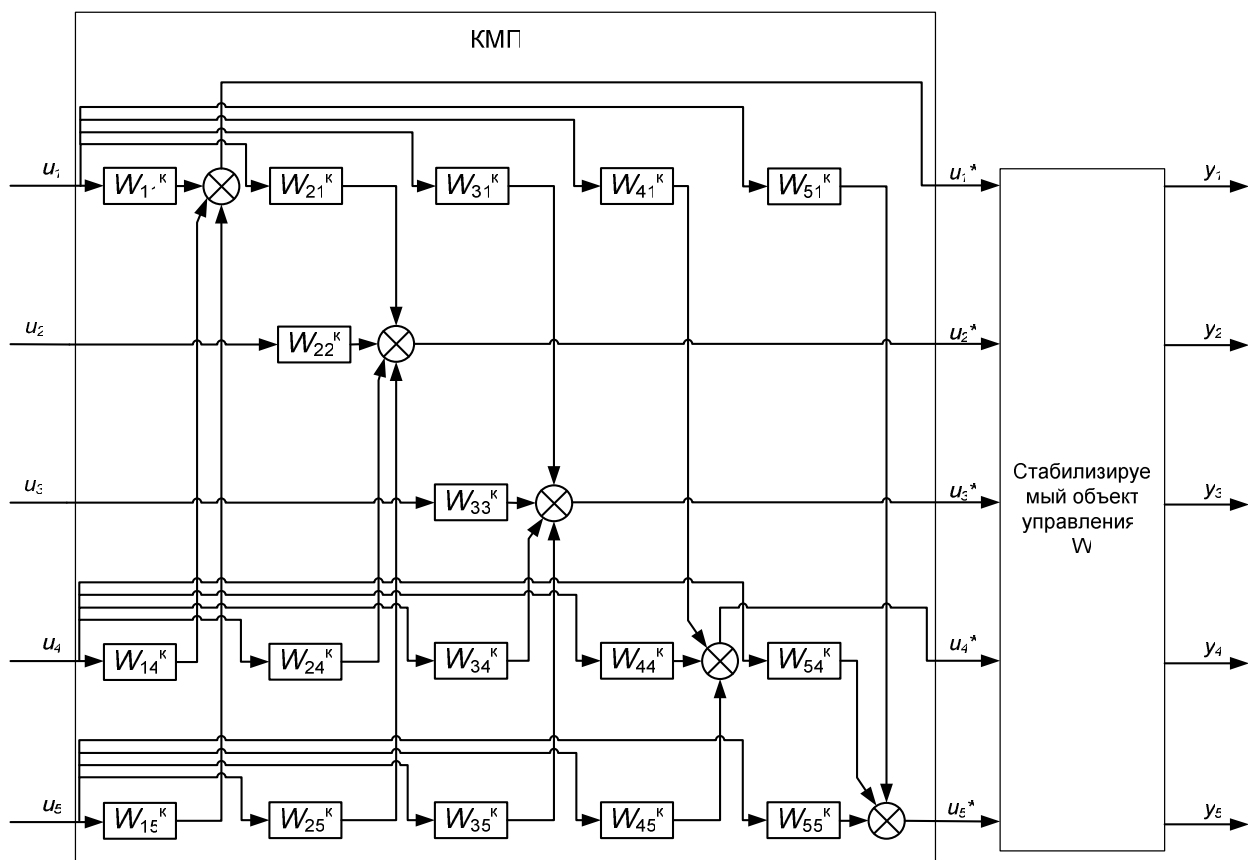


Рисунок 2 – Структурная схема блока компенсации перекрёстных связей

**В четвёртой главе** рассмотрены вопросы разработки имитационной системы, моделирующей автоматизированный технологический комплекс, и анализ эффективности разработанной системы управления.

Математическая модель исследуемого процесса и системы управления программно реализована в среде MatLab (пакеты Simulink и Neural Network). Модуль моделирования качества сырьевых потоков реализован в качестве программы для ЭВМ «Математическое моделирование и оптимизация процесса карбонизации аммонизированного рассола» (Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ в ФИПС №2008610163).

Адекватность имитационной модели проверяли на реальном технологическом объекте – карбонизационной колонне. Проверка показала, что имитационная модель обладает удовлетворительной сходимостью результатов с лабораторными анализами.

Внедрение системы управления процессом карбонизации аммонизированного рассола по показателям качества продуктов, по результатам имитационного моделирования, позволило повысить эффективность использования натрийсодержащего сырья на величину порядка 6–7% при неизменном потреблении двуоксида углерода.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы по работе сводятся к следующему:

1. Проведен анализ методов управления процессом карбонизации аммонизированного рассола в результате, которого установлено, что перспективным вариантом построения системы управления процесса карбонизации является система с моделью для вычисления ПК и оптимизатором режимов на основе модели тепловых балансов.

2. Разработана модель процесса карбонизации, базирующуюся на химической кинетике и учитывающую неопределенность реакционной смеси, которая позволяет определить предельные показатели эффективности процесса, рассчитать оптимальные режимные параметры реактора. Для целей оперативного управления по показателям качества процесса карбонизации доказана эффективность применения нейросетевого моделирования показателей качества, обоснован тип и архитектура сети, сделан выбор сети на основе показателей эффективности обучения – интегральной ошибки;

3. На основе кинетической модели сформулирована задача поиска оптимального температурного режима для процесса карбонизации, которая была решена с помощью принципа максимума Понтрягина, разработана программа оптимизации для ЭВМ.

4. Выбраны и обоснованы технологические параметры, которые оказывают наибольшее влияние показатели качества процесса. Определены тепловые эффекты технологического процесса в зависимости от расхода входящих и выходящих потоков в реактор (карбонизационную колонну). Определены основные возмущающие факторы технологического процесса на тепловой баланс колонны. Получены функциональные зависимости расхода входящих и выходящих потоков от их температуры. Для «развязки» каналов технологического объекта управления, получены передаточные функция динамического и статического компенсаторов перекрёстных связей.

5. Разработана структурная схема системы управления процессом карбонизации аммонизированного рассола по показателям качества продукции. Система определена в классе многомерных систем управления с математическими моделями технологических процессов и оптимизатором. Описана работа системы управления процессом карбонизации и работа каждого её блока и модуля.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

### *В рецензируемых журналах из списка ВАК*

1. Математическое моделирование и оптимизация процесса карбонизации аммонизированного рассола / А.Г. Афанасенко, Ю.А. Гнатенко // Математическое моделирование. 2008. Т. 20, № 9. С. 105–110.

2. Экспертная система управления процессом карбонизации аммонизированного рассола / А.Г. Афанасенко, А.П. Верёвкин // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 6. С. 10–14.

### *В рецензируемых журналах из списка ВАК*

#### *по смежным специальностям*

3. Опыт разработки и внедрения автоматизированной системы управления технологическим процессом станции фильтрации / В.А. Алексеенко, В.Ю. Коломиец, Н.Ю. Коломиец, А.Г. Афанасенко // Химическая промышленность сегодня. 2006. №2. С. 53–56.

#### *Прочие публикации*

4. Автоматизированная подсистема сбора и обработки информации для определения динамических характеристик объекта в среде Trace Mode / А.Г.Афанасенко, А.П. Верёвкин // Управление производством в системе Trace Mode: матер. 12-ой междунар. конф. и выставки. М. : AdAstrA, 2006. С.124–127.

5. О задаче разработки логико-лингвистической модели карбонизационной колонны / А.Г. Афанасенко // Наука и образование [Электронный ресурс] : электрон. научн.-техн. издан. М. : МГТУ им. Баумана, 2007. №2. <http://www.techno.edu.ru:16001/db/msg/31646.html>

6. АСУ ТП с применением резервированных контроллеров КР-300ИШ / В.А. Алексеенко, А.Г. Афанасенко, В.Ю. Коломиец, Н.Ю. Коломиец // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. №7. С 17–19.

7. Разработка математической модели процесса карбонизации с применением метода регрессионного анализа / А.Г. Афанасенко // Информационные системы и модели в научных исследованиях, промышленности и экологии: матер. всерос. научн.-техн. конф. Тула : ТулГУ, 2007. С. 32–33.

8. Нейросетевое моделирование для прогнозирования показателей качества процесса карбонизации / А.Г. Афанасенко // Химия и химическая технология в XXI веке : матер. 8-й всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и студентов. Томск : ТПУ, 2007. С. 252.

9. Статистическая идентификация процесса карбонизации / А.Г. Афанасенко // Химия и химическая технология в XXI веке: матер. 8-й всерос. науч.-практ. конф. аспирантов и студентов. Томск : ТПУ, 2007. С. 253.

10. Постановка задачи управления процессом карбонизации по показателям качества / А.Г. Афанасенко // Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности : сборник тр. 4-й междунар. науч.-практ. конф. СПб : Политехн. ун-т, 2007. Т.11. С. 441–442.

11. Цифровые промышленные сети в АСУ ТП / А.Г. Афанасенко // Динамика исследования-2008 : матер. 4-й междунар. науч.-практ. конф. София : Бял Град-БГ, 2008. Т. 29 С. 56–57.

12. Система оптимального управления процессом карбонизации на основе математической модели / А.Г. Афанасенко // Глобальный научный потенциал: матер. 4-й междунар. науч.-практ. конф. Тамбов : Тамбовпринт, 2008. С.114–115.

13. Патент на полезную модель №70881 РФ, МПК C01D 7/00. Система управления отбором суспензии из карбонизационной колонны / А.Г. Афанасенко, А.П. Верёвкин и др. ; заявл. 03.09.2007 ; опубл. 20.02.2008, Бюл. №25.

14. Патент на полезную модель № 73324 РФ, МПК C01D 7/00. Система определения показателей качества процесса карбонизации / А.Г. Афанасенко, А.П. Верёвкин и др. ; заявл. 06.12.2007 ; опубл. 20.05.2008, Бюл. №14.

15. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ №2008610163. Математическое моделирование и оптимизация процесса карбонизации аммонизированного рассола / А.Г. Афанасенко, Ю.А. Гнатенко. Роспатент, 9 января 2008.

Диссертант

А.Г. Афанасенко



АФАНАСЕНКО Алексей Геннадьевич

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КАРБОНИЗАЦИИ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ  
ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами производствами (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 14.11.2008 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.  
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.- отт. 1,0. Уч.- изд. л. 0,9.  
Тираж 100 экз. Заказ № 556

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет  
Центр оперативной полиграфии  
450000, Уфа, ул. К.Маркса,12