

На правах рукописи

Цхе Алексей Викторович

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАГРЕВОМ БАРАБАННОЙ
ПЕЧИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ПРОИЗВОДСТВА
БЕЗВОДНОГО ФТОРОВОДОРОДА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2006

Работа выполнена на кафедре «Электропривода и электрооборудования»
Электротехнического института Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Букреев Виктор Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кербель Борис Моисеевич
кандидат технических наук, профессор
Зайцев Александр Петрович

Ведущая организация: **НИИ Автоматики и электромеханики
при Томском государственном
университете систем управления и
радиоэлектроники**

Защита диссертации состоится «20» декабря 2006 года 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета К212.269.03 Томского политехнического университета по адресу: 634034, Томск, пр. Ленина 30

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г.Томск, ул.Белинского, 55

Автореферат разослан «14» ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Дементьев Ю.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Промышленный способ производства фтороводорода (HF) основан на разложении флюоритового концентрата (ФК) с содержанием CaF_2 95-99% серной кислотой во вращающихся барабанных печах с внешним электронагревом. С растущими требованиями к экономической эффективности производства фтороводорода, вызванными ростом цен на сырье и рабочую силу, возникает потребность в улучшении качества протекания технологического процесса и увеличении межремонтного цикла технологического оборудования, путем создания автоматизированной системы управления, позволяющей вести технологический процесс в оптимальном режиме.

Для обеспечения высокой степени разложения ФК необходимо установить жесткие требования к тепловому режиму технологического аппарата, системе дозирования и составу компонентов производства фтороводорода. Степень разложения ФК и рабочей смеси кислот зависит в большей степени от величины теплового потока и условий теплопередачи от ТЭНов к реакционной среде (РС). Температура РС определяет кинетические параметры процесса, и степень разложения зависит от многих факторов, в том числе от температуры в зонах обогрева и среднего времени пребывания смеси в печи. В свою очередь, время пребывания РС в печи находится в определённой зависимости от скорости вращения и угла наклона барабана. Ошибки в управлении электротехническим комплексом барабанной печи приводят как к экономическим потерям электроэнергии и сырья в виде высокой концентрации исходных реагентов в отвале, так и ухудшению экологических показателей производства в связи с высокой токсичностью исходных реагентов и продуктов реакции в отвале. Избыточный нагрев РС приводит к спеканию продуктов реакции, испарению серной кислоты, что загрязняет готовый продукт, а также к увеличению энергозатрат. Всё изложенное и определяет актуальность вопросов, рассмотренных в диссертационной работе.

Цель работы и задачи исследования

Цель диссертационной работы состоит в разработке математического и алгоритмического обеспечения для системы управления нагревом и электроприводом вращения барабанной печи сернокислотного разложения флюоритового концентрата, что позволит установить необходимый температурный профиль для эффективного протекания химической реакции, а также стабилизировать производительность барабанной печи на регламентном уровне, ресурсо- и энергосбережения технологического процесса.

Для достижения цели поставлены следующие основные задачи:

- анализ теплохимических процессов, происходящих в барабанной печи;

- создание статической и динамической тепловой модели процесса разложения флюоритового концентрата серной кислотой в барабанной печи;
- разработка динамической модели движения реакционной среды в барабанной печи;
- создание алгоритмов согласованного управления системой нагрева и электропривода вращения барабанной печи на основе разработанных моделей;
- проведение экспериментальных исследований по подтверждению эффективности разработанных алгоритмов.

Методы исследований

Для решения поставленных задач в диссертационной работе применялись методы теории автоматического регулирования, математического моделирования с использованием аппарата дифференциального и интегрального исчисления и моделирования на ЭВМ. Экспериментальные исследования проводились на макетной установке в лабораторных условиях и на промышленной установке получения фтороводорода.

Научная новизна:

- созданы статическая и динамическая модели нагрева и движения реакционной среды в барабанной печи, позволяющие повысить точность оценки температуры реакционной среды в зависимости от частоты вращения и мощности нагрева;
- предложен алгоритм согласованного управления системой электронагрева и электроприводом вращения барабанной печи на основе эталонных моделей, обеспечивающий максимальную производительность печи;
- разработан алгоритм идентификации параметров передаточных функций зон нагрева барабанной печи, позволяющий вести перенастройку параметров регуляторов температуры зон нагрева в реальном времени с учётом изменения расхода и марки сырья.

Практическая значимость

- предложена инженерная методика расчета уставок регуляторов температур зон нагрева и задания частоты вращения электропривода барабанной печи, позволяющая учитывать протекающие тепло- химические и физические процессы, а также характер движения РС внутри барабанной печи;
- разработана программа расчета тепловых потоков и времени пребывания реакционной среды в барабанной печи, позволяющая устанавливать необходимый температурный профиль печи управляя электротехническим комплексом технологического аппарата;
- создана экспериментальная установка для исследования тепловых процессов в барабанной печи и движения реакционной среды,

позволяющая исследовать разработанные алгоритмы управления электротехническим комплексом.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов подтверждается математическим обоснованием разработанных моделей, сопоставимостью показателей экспериментальных и теоретических исследований, а также положениями теории автоматического управления.

Реализация результатов работы

Основные результаты диссертации получены при выполнении хоздоговорной НИР «Разработка комплекса технических средств автоматической системы управления печи разложения плавикового шпата» на Сибирском химическом комбинате.

Результаты проведенных исследований нашли применение на Ангарском электролизно-химическом комбинате, Сибирском химическом комбинате и в учебном процессе Томского политехнического университета.

Основные положения, выносимые на защиту:

- статическая модель теплового процесса разложения флюоритового концентрата серной кислотой в барабанной печи;
- динамическая модель теплового процесса разложения флюоритового концентрата серной кислотой в барабанной печи;
- алгоритм идентификации параметров теплового процесса для перенастройки регуляторов температуры зон нагрева;
- алгоритм согласованного управления системой нагрева и электроприводом барабанной печи по эталонной модели;
- программно-аппаратная реализация алгоритма управления на имитационной установке.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на межвузовской конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» 5 – 12 октября 2003 года г. Бийск, на десятой юбилейной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 400-летию г. Томска «Современные техника и технологии», 29 марта – 2 апреля 2004 года г. Томск, на научно-технической конференции «Технология и автоматизация атомной энергетики» 22 – 26 мая 2006 года г. Северск и научных семинарах кафедры электропривода и электрооборудования Электротехнического института Томского политехнического университета. Результаты выполненных исследований отражены в 9 печатных работах, в том числе в 8 статьях и тезисах докладов, и одном авторском свидетельстве о регистрации программного продукта для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 146 страниц, в том числе 67 рисунков, 14 таблиц, список литературы из 72 наименований, 5 приложений.

Содержание работы

Во введении показана актуальность темы данной диссертационной работы, определены ее основные цели, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрена технологическая схема основного аппарата барабанной печи разложения флюоритового концентрата и его конструкционные особенности. Особое внимание уделено теплохимическим процессам, протекающим при разложении флюоритового концентрата серной кислотой в барабанной печи вращающегося типа. Проведен анализ электротехнического комплекса как объекта управления и разработаны критерий и цели управления для оценки эффективности работы электротехнического комплекса.

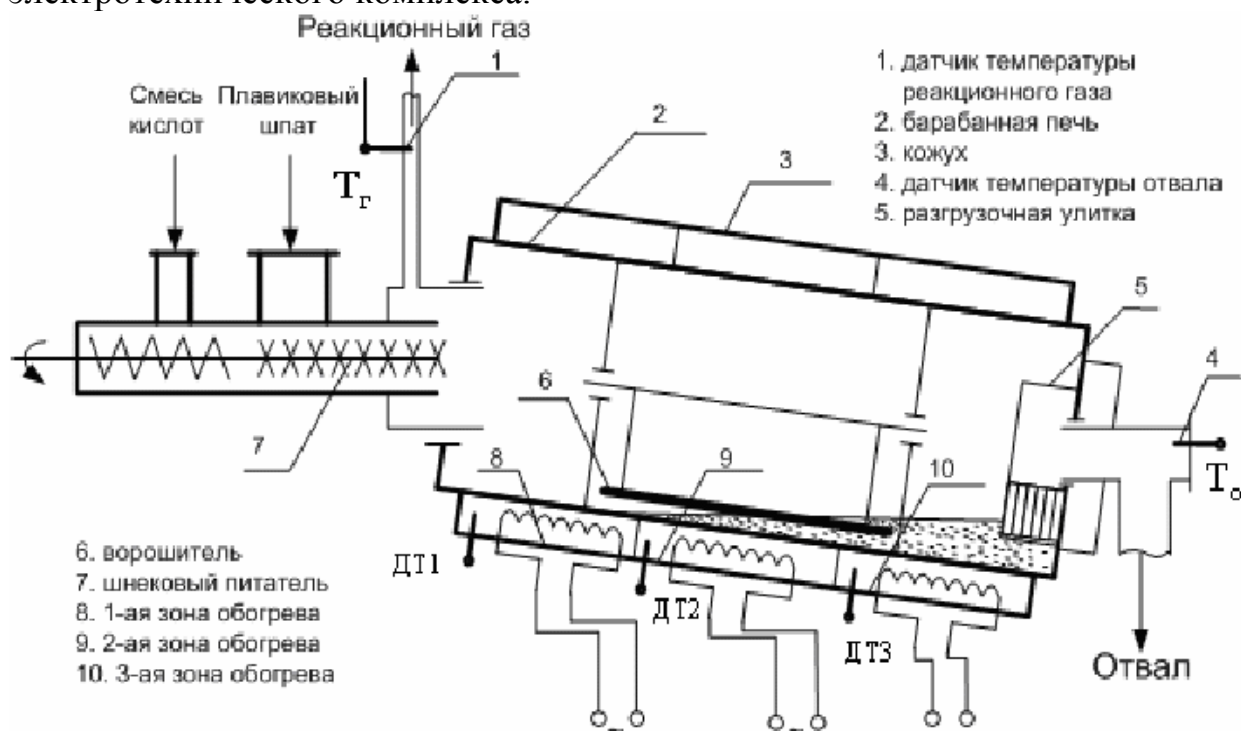


Рис. 1. Схема технологического аппарата

Схематическое устройство технологического аппарата показано на рис.1. Сырьевой материал поступает в барабанную печь через шнековый питатель. Температура в трех зонах нагрева барабанной печи поддерживается при помощи ТЭНов, которые могут коммутироваться как по команде оператора, так и вычислительным устройством.

В проведенных исследованиях кинетического процесса разложения, результаты которых обработаны по уравнению Козеева–Еремеева – Колмогорова для топахимических реакций и по уравнению Ратиняна–

Дроздова – для самотормозящихся процессов, определено, что процесс реагирования делится на три стадии:

- переходная область, где энергия активации $E_{\text{акт}}=30,6$ кДж/моль;
- первая диффузионная область, $E_{\text{акт}}=15,7\div 21,0$ кДж/моль;
- вторая диффузионная область, $E_{\text{акт}}=11,1\div 12,6$ кДж/моль.

Определяющим фактором скорости процесса разложения является температура. Исследования процесса разложения различных фракций ФК подтверждают общие закономерности. Поскольку диффузионная область является самой медленной частью процесса разложения ФК серной кислотой, то лучшее перемешивание в пространстве барабана увеличивает скорость реакции за счет уменьшения толщины пленки продуктов реакции вокруг зерна CaF_2 , в которой действуют законы диффузии.

Уравнения, связывающие степень вскрытия флюорита с температурой РС и временем реагирования, на разных стадиях реакции имеют вид

$$\ln(1 - \alpha_I) = -1.32 \cdot 10^3 \cdot t_{\delta}^{1.1} \exp(-3680/T_a),$$

$$\ln(1 - \alpha_{II}) = -162.2 \cdot t_{\delta}^{0.45} \exp(-2520/T_a),$$

$$\ln(1 - \alpha_{III}) = -44.7 \cdot t_{\delta}^{0.14} \exp(-1520/T_a),$$

где α_I , α_{II} , α_{III} — степень вскрытия флюорита на первой, второй и третьей стадии реакции соответственно; t_p — время реагирования, с; T_a — температура реакционной среды (РС) °К.

Данные уравнения получены при обработке результатов экспериментов по уравнениям Ерофеева, разработанным для описания кинетики самогасящихся реакций. Используя табл. 1, можно определить границы различных стадий реагирования ФК.

Табл. 1

Разложения флюорита в зависимости от температуры реакционной массы для различных стадий (по уравнениям Ерофеева)

Температура РС, °С	Степень разложения флюорита по стадиям процесса, %		
	I	II	III
110	0 - 48	48 - 86	> 86
150	0 - 62	62 - 87,8	> 87,8
180	0 - 77	77 - 92	> 92
200	0 - 80	80 - 95,4	> 95,4

Используя вышеприведенные, а также производственные данные по распределению температур в барабанной печи (в конце первой зоны обогрева – 90°С, второй - 110°С, третьей - 160°С), среднего времени пребывания реакционной массы по зонам нагрева равным, соответственно, 0,5; 1,0; 1,5 часам, можно получить зависимость скорости реакции по длине печи. Зависимость скорости процесса серноокислотного разложения ФК по длине печи показана на рис. 2.

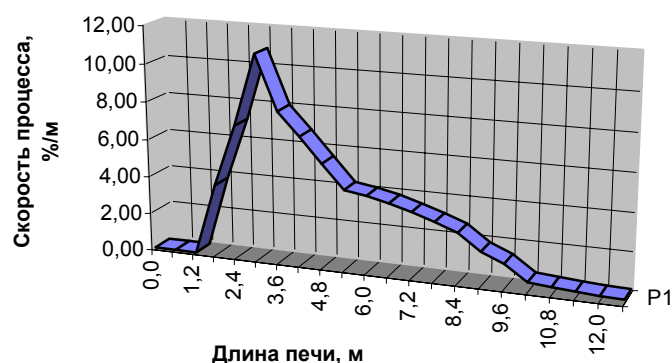


Рис. 2. Скорость реагирования ФК по длине печи по уравнениям Ерофеева

Таким образом, при условии соблюдения регламентного температурного профиля РС в барабанной печи, в первой зоне нагрева реагирует 38% ФК, во второй – 48% и, следовательно, в последней – третьей зоне нагрева, – оставшиеся 14% флюоритового концентрата. Следовательно, для эффективного протекания процесса разложения ФК в барабанной печи необходимо создать условия для своевременного поступления тепловых потоков, достаточных для нагрева РС и поддержания химической реакции.

Основными измеряемыми в производстве НФ переменными теплового режима являются температура отвала $T_{отв}$ и температура реакционного газа $T_{рг}$. Температура отвала согласно регламенту технологического процесса должна поддерживаться на уровне 160°C, а реакционного газа – 110÷130°C. Управление тепловым режимом производится путем стабилизации на оптимальном уровне температур T_1 , T_2 , T_3 зон нагрева печи релейными регуляторами. Значения задаваемых температур в зонах барабанной печи могут изменяться в диапазоне 400÷600°C.

Таким образом, при решении задачи управления процессом разложения флюоритового концентрата во вращающейся печи необходимо обеспечить следующие технологические требования:

- поддержание теплового режима печи разложения, при котором обеспечивается поступление необходимого количества тепловой энергии;
- обеспечение оптимального, с точки зрения степени разложения среды, распределения тепловой энергии по зонам нагрева;
- обеспечение необходимой скорости вращения барабанной печи для наиболее полного разложения исходных компонентов.

Предлагаемый вариант системы управления электротехническим комплексом содержит две управляемые подсистемы:

- подсистему управления тепловым режимом барабанной печи;
- подсистему управления электроприводом вращения барабанной печи.

Во второй главе проведено построение статической модели теплового процесса разложения флюоритового концентрата в барабанной печи. При построении моделей были приняты следующие допущения:

- процесс теплообмена в камере печи принимается стационарным, соответствующим режиму наибольшей температуры нагреваемых изделий;
- при передаче тепла от ТЭНов к поверхности барабана учитывается лишь излучение, ролью конвекции пренебрегают;
- все участвующие в теплообмене тела являются серыми;
- температуры всех нагреваемых точек поверхностей принимаются равными.

Расчеты при построении статической модели теплового процесса производились на основании уравнений материального и теплового баланса, а также закона сохранения массы при химических превращениях вещества. В результате получена система уравнений (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = Q_{\text{оэi}} + \sum Q_i, \\ Q_1 = Q \cdot 0,41, \\ Q_2 = Q \cdot 0,44, \\ Q_3 = Q \cdot 0,15, \\ \dot{Q}_1 = \dot{Q}_{\text{оn1}} + Q_1 \cdot K_1, \\ \dot{Q}_2 = \dot{Q}_{\text{оn2}} + Q_2 \cdot K_2, \\ \dot{Q}_3 = \dot{Q}_{\text{оn3}} + Q_3 \cdot K_3, \end{array} \right. \quad (1)$$

где m_i – масса i -й компоненты химической реакции; Q_i – энергия, выделяемая (поглощаемая) при образовании i -й компоненты химической реакции; $Q_{\text{хим}}$ – энергия, затрачиваемая на химическую реакцию; Q – энергия, необходимая для ведения технологического процесса; Q_1, Q_2, Q_3 – энергия, подводимая в 1-ю, 2-ю и 3-ю зону нагрева; $T_{\text{pс1}}, T_{\text{pс1}}, T_{\text{pс1}}$ – температура реакционной среды в зонах нагрева; K_1, K_2, K_3 – коэффициенты, рассчитанные на основе анализа работы технологического аппарата.

В результате решения данной системы уравнений получены значения температур зон нагрева, которые необходимо поддерживать при постоянном расходе технологической среды. При расчете значений температур учтены скорость реакции флюорита, требуемое распределение температур по всей длине печи разложения, состав флюорита и рабочей смеси кислот, заданные технологические значения температур продукционного газа и выходящего отвала. В результате стабилизации полученных расчетных температур обеспечивается степень вскрытия флюорита не хуже 98% (при избытке серной кислоты над стехиометрическим количеством 5-10%) и температуры продукционного газа в заданных границах (110 - 150°C).

Разработана динамическая модель теплового процесса в барабанной печи, функциональная схема которой представлена на рис. 3.

Блок 1 обеспечивает расчёт количества энергии, излучаемого ТЭНами, в зависимости от подводимого напряжения электрического тока. Выход блока 1 является входом блока 2, где происходит расчёт тепла, поглощенного печью. Задача блока 4 – расчет массы реагентов, находящихся

в зоне обогрева на каждый шаг дискретизации. Информация блока 4 используется для расчета прироста температуры и для перевода массовой загрузки в молярную в блоке 5. Блок 6, получая информацию о текущей температуре реакционной массы и массы сырьевого потока, вычисляет энергию, затрачиваемую на химическую реакцию в технологической среде. В блоке 8 рассчитываются потери тепла. Блок 9 суммирует расчетные данные блоков 2, 6, 8. Результат суммирования поступает на блок 3, где рассчитывается увеличение температуры за шаг дискретизации расчета. Информация об изменении температуры поступает на блок 7, который интегрирует температуру в течение времени пребывания технологической среды в зоне нагрева. Сумматор блока 10 учитывает изменения значений начальной температуры. Регистрация расчетных данных происходит в блоке 11.

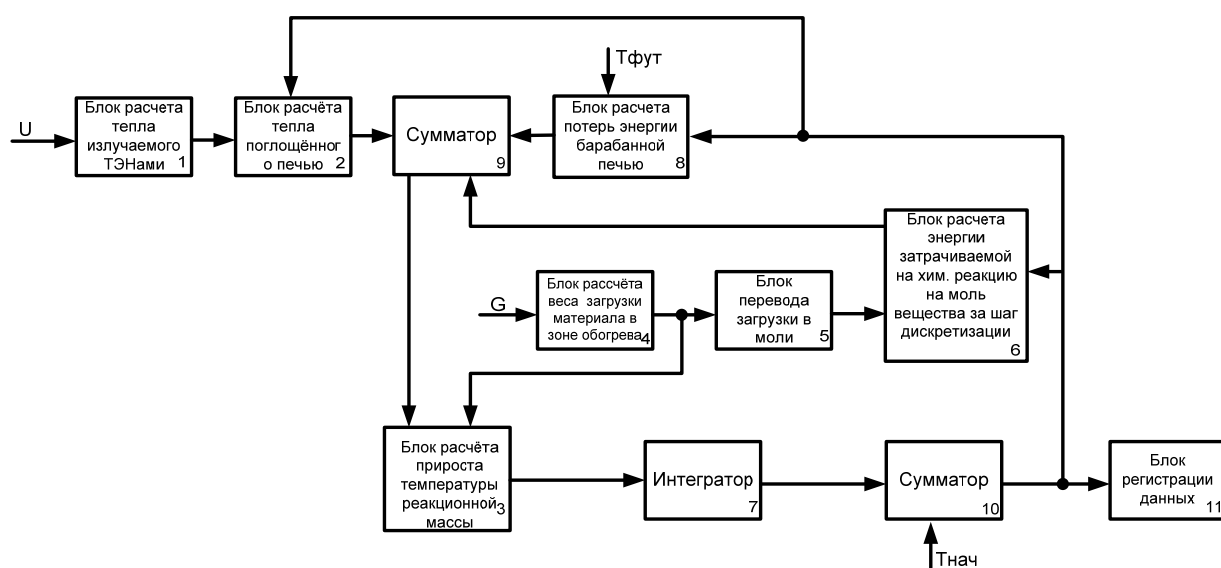


Рис. 3. Функциональная схема динамической модели U – напряжение, подаваемое на ТЭНы; G – расход ФК; $T_{фут}$ – температура футеровки; $T_{нач}$ – начальная температура РС

Для оценки адекватности разработанной модели использовались промышленные исследования. Сравнение данных осуществлялось в режиме перехода от одного температурного уровня к другому (рис. 4).

По полученным кривым оцениваем погрешность моделирования. Среднеквадратичное отклонение составляет $S_n=1,44$, относительная погрешность $\sigma = 1,41 \%$.

Для учета влияния скорости вращения барабанной печи, состава исходных реагентов и производительности подсистемы загрузки на процесс движения РС в барабанной печи была построена модель движения материала внутри барабанной печи. Модель реализована в пакете *Matlab 6.5 Simulink*.

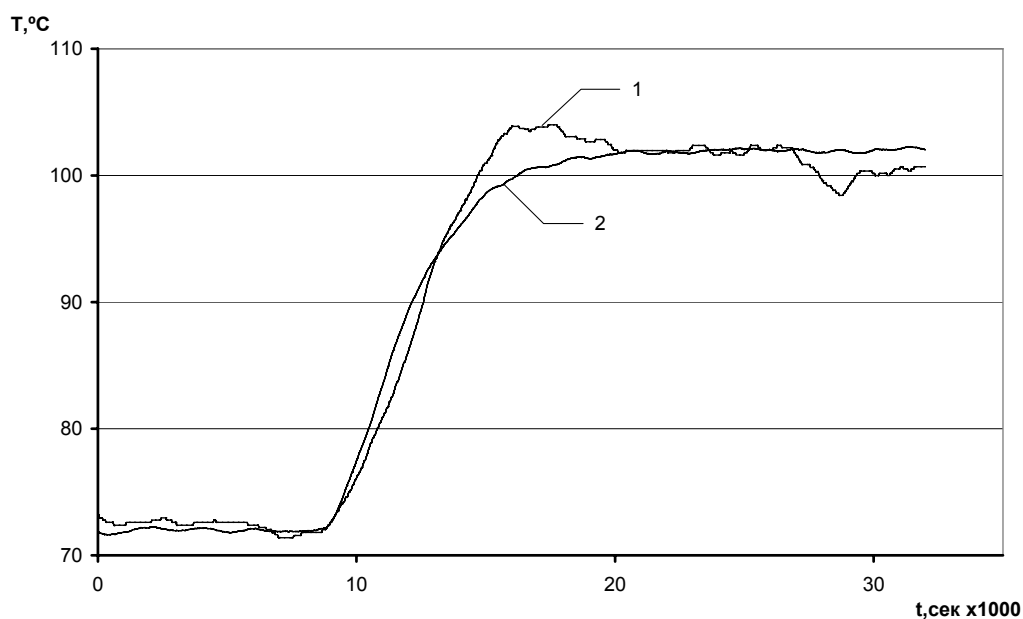


Рис. 4. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных исследований:

1 – экспериментальные данные; 2 – результаты моделирования

Результаты моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на макетной установке. Экспериментальные исследования проводились на кварцевом песке. На рис. 5 показана зависимость времени пребывания материала в барабанной печи от частоты вращения, а также экспериментальные точки при частотах вращения барабана 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5 об/мин. Погрешность построенной модели по отношению к экспериментальным данным составила 3,4%. Рассмотрим формы зависимостей для других видов материалов на построенной модели движения. Исследования проводились для кварцевого, речного и крупнозернистого песка. Зависимости представлены на рис. 6

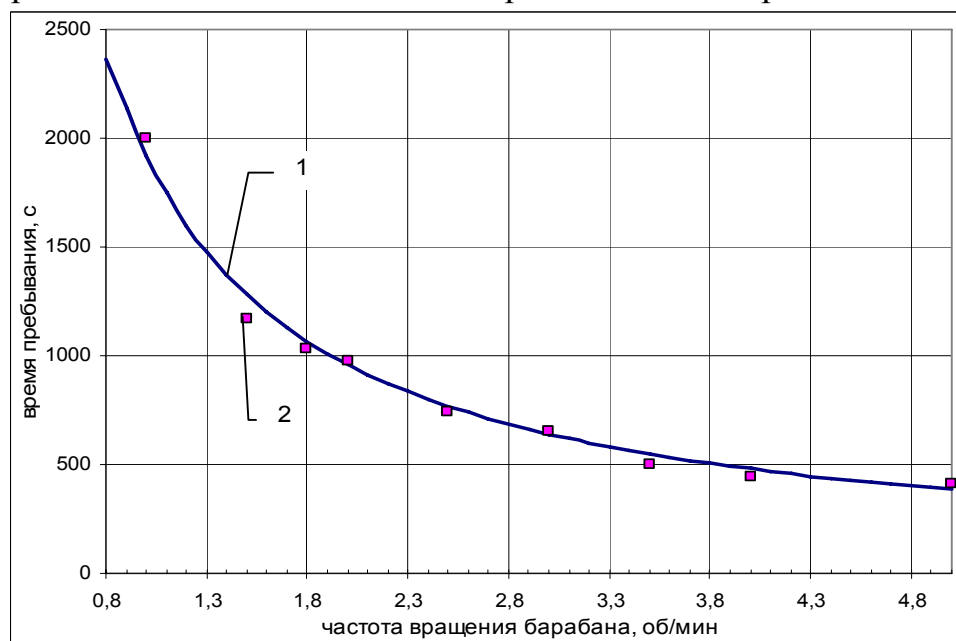


Рис. 5 Зависимость времени пребывания материала в барабанной печи от частоты вращения: 1 – результаты моделирования; 2 – экспериментальные данные

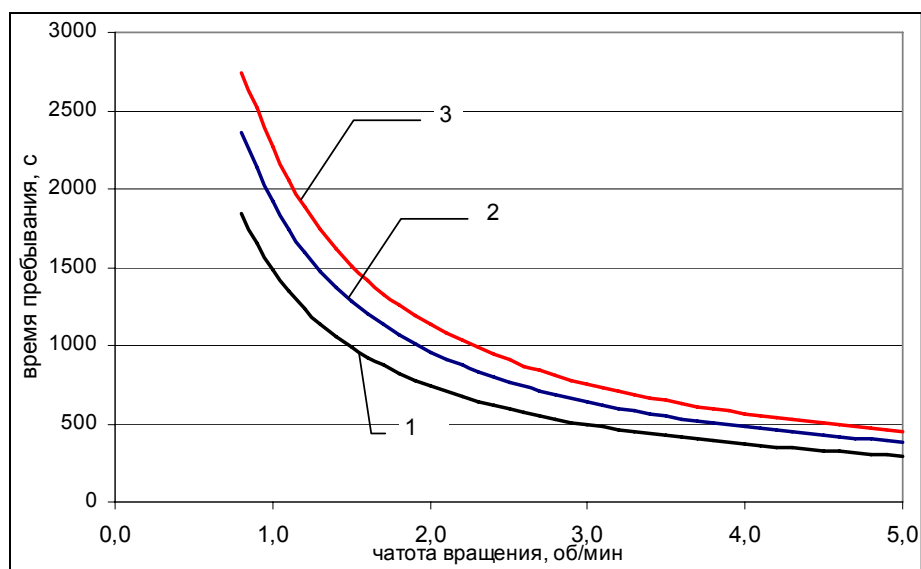


Рис. 6 Зависимость времени пребывания материала в барабанной печи от частоты вращения: 1 – крупногранулированный песок; 2 – кремниевый песок; 3 – речной песок

Найденные зависимости описываются функцией вида

$$t_{\text{пребывания}} = f(n) = \frac{a_k}{a_m \cdot n^{a_n}}, \quad (2)$$

где a_k , a_m , a_n – коэффициенты, зависящие, от свойств материала; n – частота вращения барабанной печи. Зависимости описываются функцией (2) погрешностью менее 1%. (см. рис. 6)

Таким образом, используя построенную модель движения материала с учетом информации о реологических свойствах РС на разных стадиях протекания процесса, можно рассчитать время пребывания РС в каждой из зон нагрева барабанной печи.

Необходимо отметить, что точность построенной аналитической модели движения зависит от точности задания реологических свойств РС на каждом из исследуемых участков движения среды.

В третьей главе описан алгоритм управления электротехническим комплексом барабанной печи для автоматизированного управления мощностью нагрева печи, стабилизации температуры отвала и реакционного газа и управления частотой вращения барабанной печи. Алгоритм обеспечивает следующие функции системы управления:

- по уравнениям материального и теплового баланса определяется количество энергии, потребляемое процессом разложения флюоритового концентрата;
- рассчитывается необходимое время пребывания реакционной среды в барабанной печи в зависимости от производительности подсистемы дозирования;
- вычисляется скорость вращения барабанной печи в зависимости от необходимого времени пребывания;
- формируется задание на систему управления электроприводом печи;

- вычисляется необходимая мощность нагревательных зон в зависимости от расхода исходных компонентов;
- рассчитывается управляющее воздействие на ТЭНы зон нагрева барабанной печи.

Блок-схема алгоритма вычисления уставок температур зон нагрева барабанной печи представлена на рис.7.

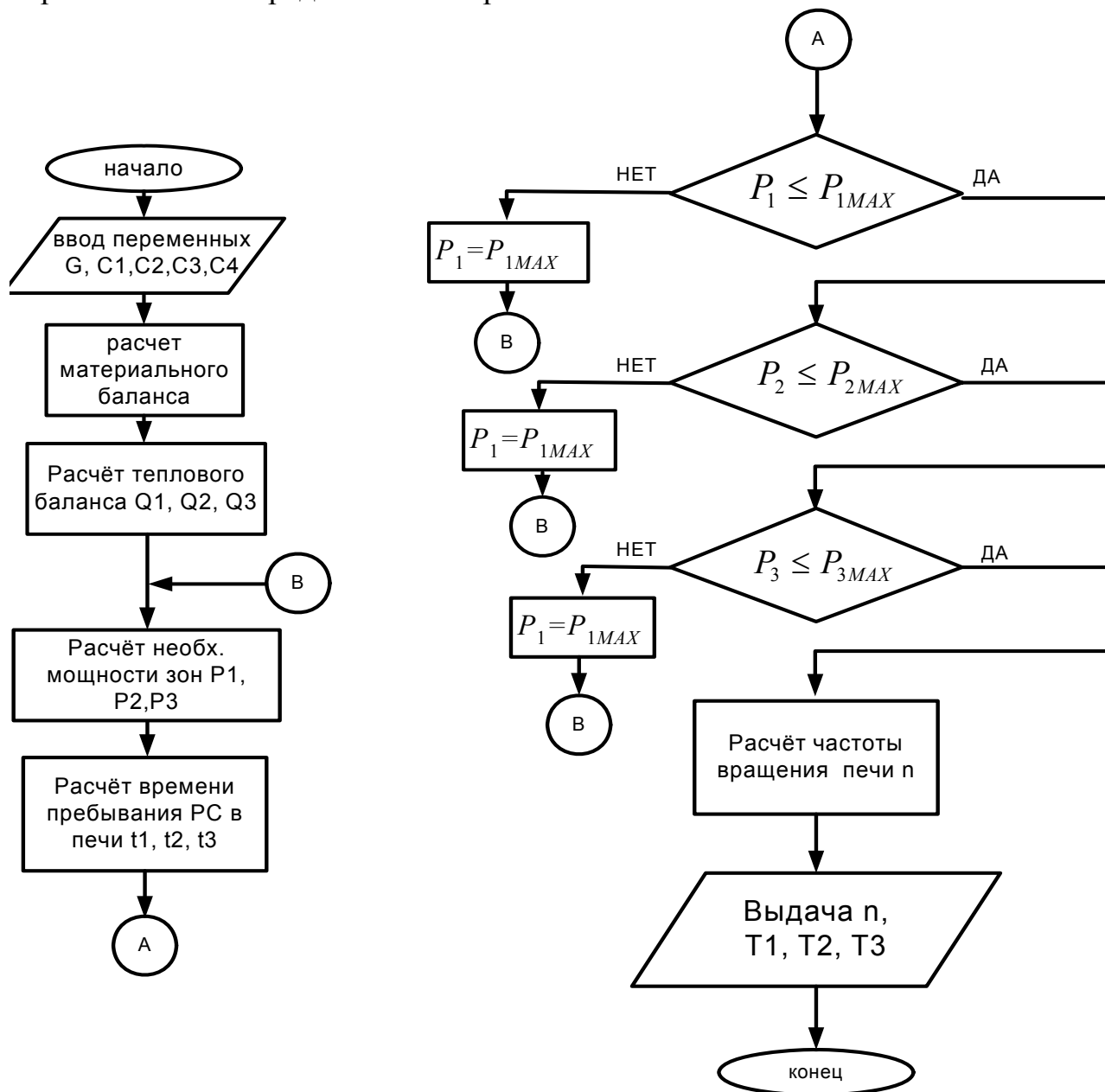


Рис 7. Блок-схема алгоритма вычисления уставок зон нагрева барабанной печи

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что в различных режимах работы барабанной печи параметры передаточных функций нагревательных камер значительно изменяются во времени. В ходе проведенных экспериментальных исследований первой зоны нагрева на объекте управления были сняты кривые переходных процессов при изменении температуры зон нагрева в различных режимах работы технологического аппарата. Результирующие кривые были описаны

инерционным звеном первого порядка и определены параметры передаточной функции нагревательной камеры. Полученные данные параметров передаточных функций представлены в табл. 2.

Табл. 2

Параметры передаточной функции нагревательной камеры				
	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3	Эксперимент 4
τ, c	90	120	90	120
K_0	1,35	2,88	1,32	1,082
T_0, c	511	1810,6	1131,5	923,7

Коэффициенты передаточной функции, описывающей переходные процессы в нагревательной камере, значительно меняются в зависимости от режимов работы печи (см. табл. 2). При таком изменении параметров, для организации качественного управления температурными режимами нагревательной камеры с минимальными временем регулирования и перерегулированием, необходимо изменять параметры настройки регуляторов в зависимости от текущих параметров объекта управления. Для идентификации параметров передаточной функции нагревательной камеры предложен алгоритм, блок-схема которого показана на рис. 8.

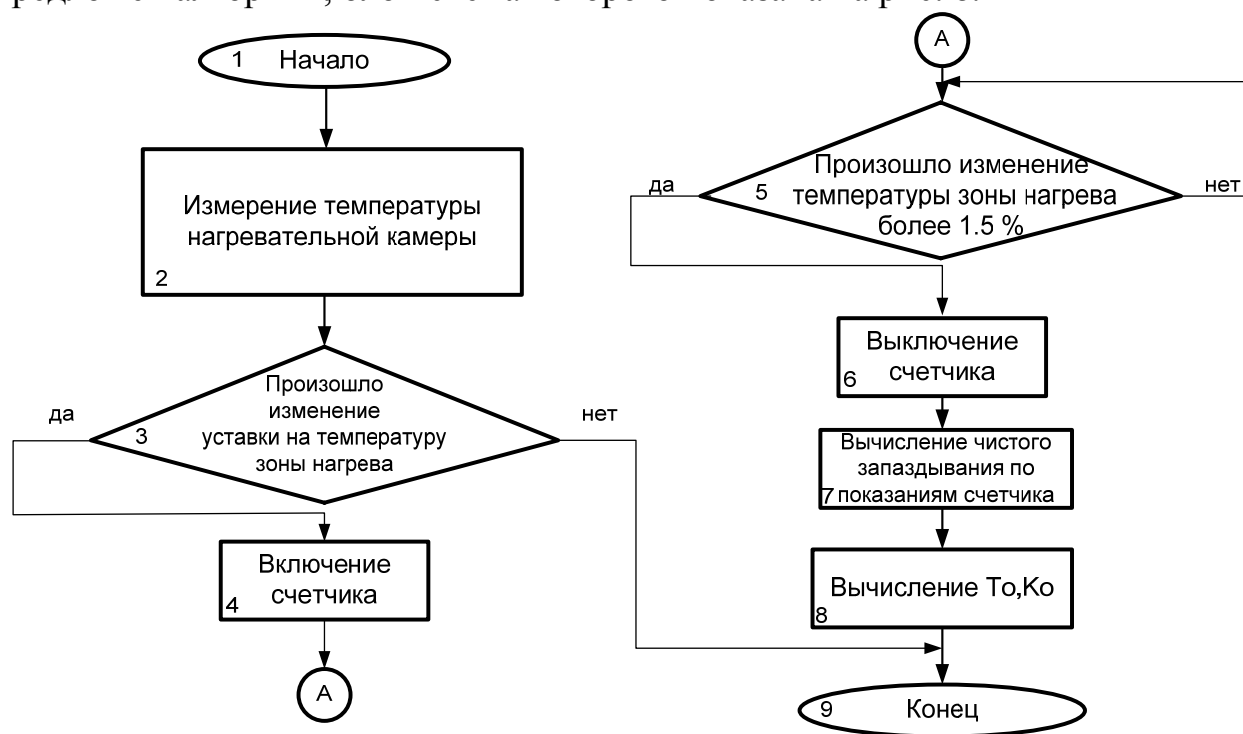


Рис. 8. Блок-схема алгоритма идентификации параметров передаточной функции нагревательной камеры

Алгоритм выполняет следующие функции:

- измерение значений температуры;
- определение времени запаздывания:
 - включение счетчика времени;
 - определение показаний счетчика после его отключения;
- определение постоянной времени теплового объекта:
 - выбор четырех рабочих точек t_1, t_2, t_3, t_4 с интервалом Δt ;

- определение постоянной времени объекта с помощью формулы

$$T_o = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{Y_1 - Y_2}{Y_2 - Y_3}\right)};$$

- идентификация коэффициента передачи объекта:
 - определение коэффициента передачи с помощью формулы

$$K_o = \frac{Y_1 - e^{\frac{-\Delta t}{T_o}} Y_2}{(1 - e^{\frac{-\Delta t}{T_o}}) X_2}.$$

Используя полученные данные о передаточной функции, можно вычислить параметры настройки регулятора для настройки контуров стабилизации температуры зон нагрева.

Проверка разработанного алгоритма управления проводилась на компьютерной модели. Для оценки эффективности алгоритма управления тепловым режимом барабанной печи с использованием контура управления электроприводом была смоделирована работа подсистем управления согласно структурой схеме (см. рис. 9). В определённый момент времени моделирования было подано 40 % возмущение по расходу ФК. Результаты моделирования представлены на рис. 10. Зависимости 1, 2 показывают, что температура реакционной среды в зонах нагрева отклонилась от заданных значений менее чем на 1 %. На рис. 10 видно, как изменялась уставка для электропривода барабанной печи. При производительности подсистемы дозирования в 580 кг/ч для оптимального режима печи алгоритмом управления была выбрана частота вращения 2,21 об/мин, при которой обеспечивается нагрев поступающей РС в первой зоне – 90 °С, второй – 130 °С и третьей – 160 °С. При подаче возмущающего воздействия, по мере заполнения барабанной печи РС с другой производительностью, алгоритмом управления производилось плавное понижение скорости вращения до 1,31 об/мин, тем самым увеличивая время пребывания РС в барабанной печи. По результатам моделирования наглядно видно, что разработанный алгоритм управления обеспечивает качественное управление подсистемами нагрева и вращения технологического аппарата производства в автоматическом режиме и может быть рекомендован к применению на производстве.

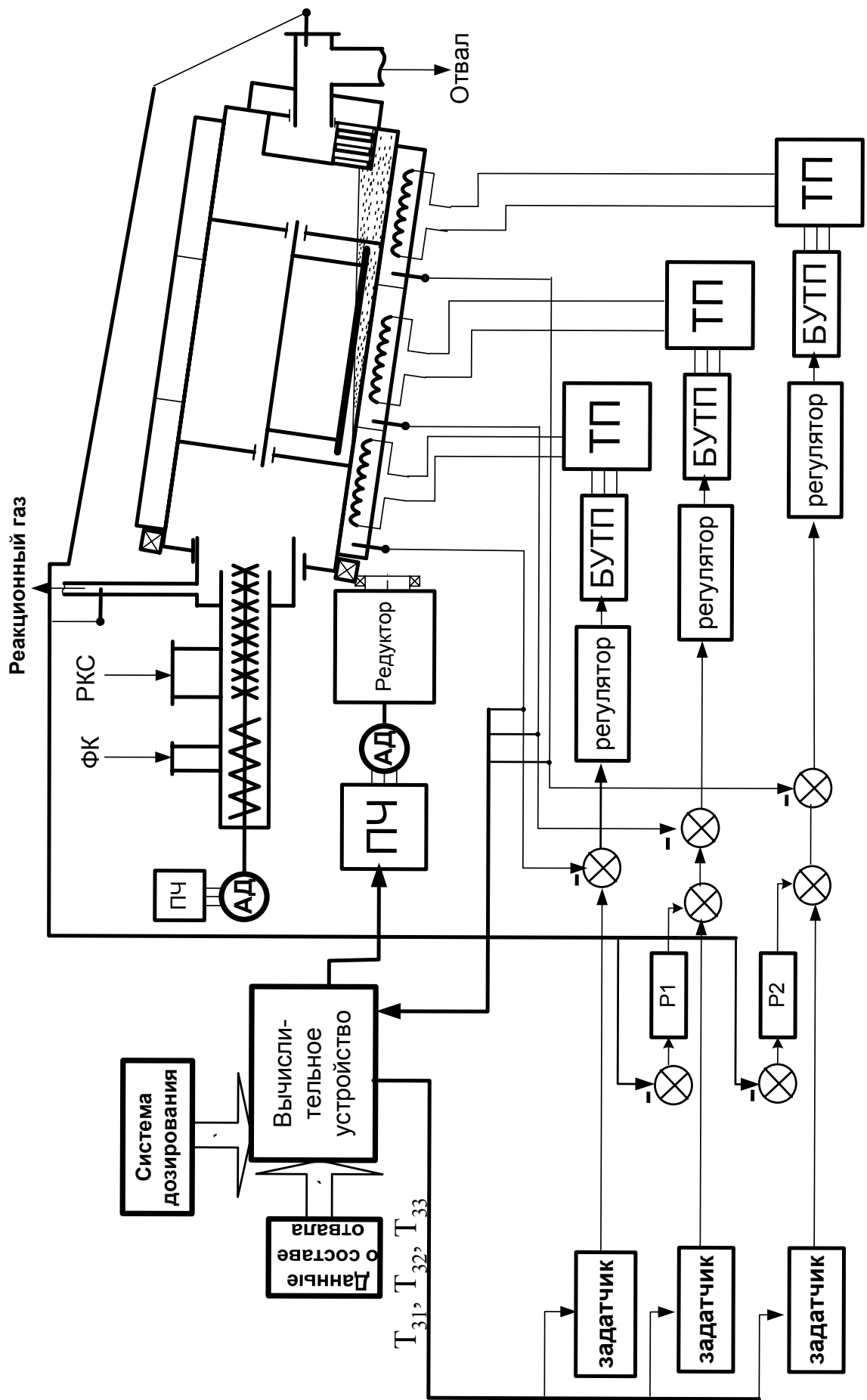


Рис. 9. Структурная схема компьютерной модели управления электротехническим комплексом барабанной печи

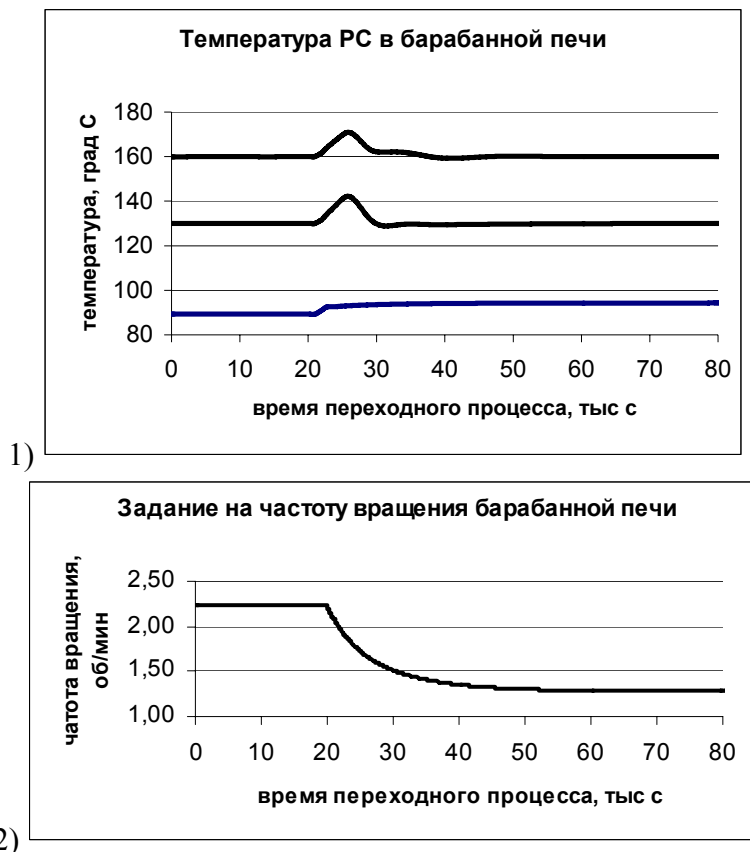


Рис. 10. Результаты моделирования работы подсистем управления нагревом и вращением барабанной печи: 1) температура реакционной среды; 2) частота вращения барабанной печи

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов управления на экспериментальной установке. Экспериментальная установка состоит из макета барабанной печи, оборудованной загрузочной воронкой в передней крышке, разгрузочной задней крышкой, приводной шестернёй, бандажом и опорными роликами. Во вращение барабан приводится электродвигателем постоянного тока через редуктор. Загрузка производится шнековым питателем. В качестве РС в печь загружается песок. Обогревается печь ТЭНами. Тиристорный преобразователь, управляемый компьютером, служит для регулирования мощности ТЭНов. Контроль температуры ведется в 3 точках. Измеряется начальная температура загружаемого песка, температура воздуха над ТЭНами и температура песка на выходе из барабанной печи. Внешний вид установки показан на рис. 11.

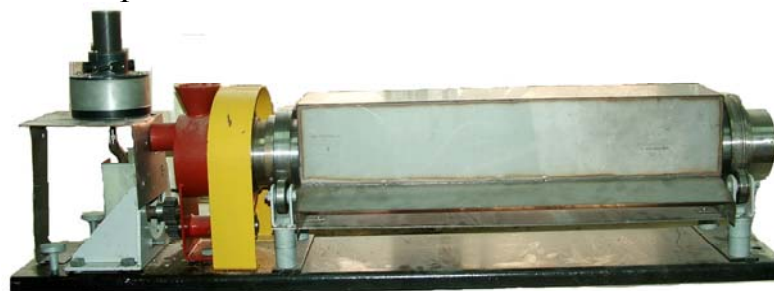


Рис. 11. Внешний вид экспериментальной установки

Используя динамическую модель адаптированную к имитационной установке, рассчитана зависимость температуры отвала от мощности нагревательной камеры. Результаты моделирования и экспериментальные данные приведены на рис.12, экспериментальные данные совпадают с результатами моделирования, причем относительная погрешность составила $S_n=1,4$, а приведенная погрешность – $S_{пр}=2\%$.

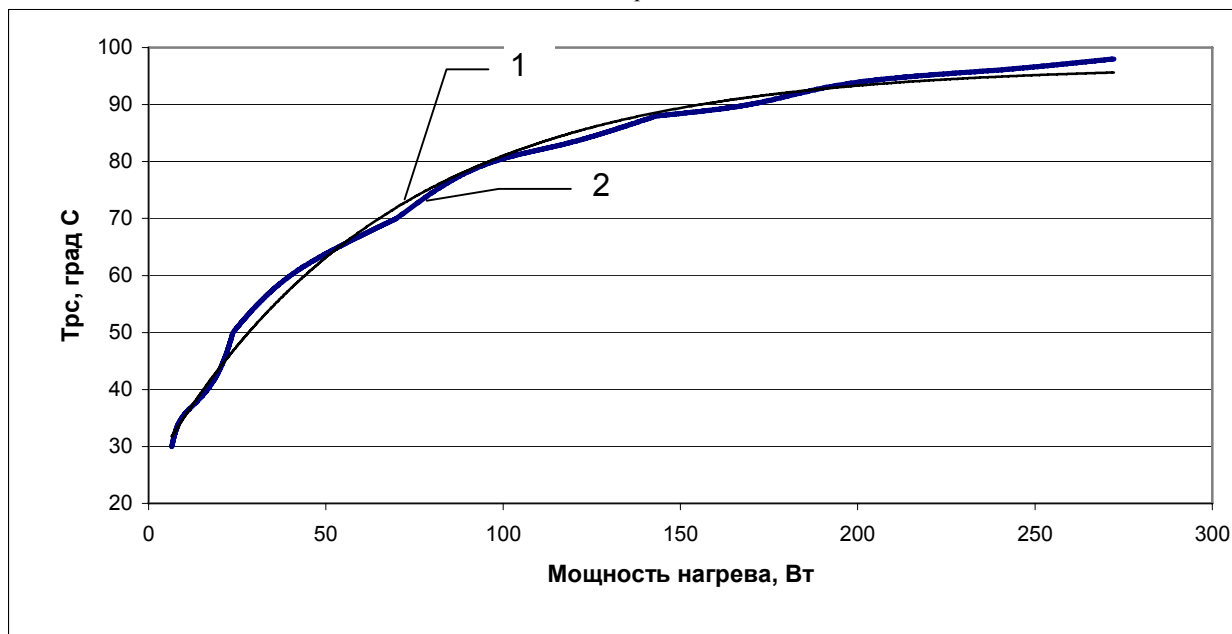


Рис. 12 Сравнение экспериментальных данных и результатов моделирования
1) результаты моделирования; 2) экспериментальные данные

На основании результатов моделирования был проведен эксперимент по управлению имитационной установкой на математической модели с расчётом необходимой мощности для достижения заданной температуры отвала. Результаты проведённого эксперимента представлены в табл. 3.

Табл. 3

Результаты эксперимента по достижению заданной температуры РС

Температура РС, град С	Расчётная мощность, Вт	Оценка температуры РС, град С
55	35,6	58
65	54,2	65
75	81,2	75
80	96,1	79
85	119,4	83
90	164,9	89
95	246,6	96

В результате проведенного эксперимента, при управлении температурой РС в отвале имитационной установки восстановление расчетной температуры обеспечивалось с относительной погрешностью $S_n=1,63$, а приведенная погрешность составила $S_{пр}=4\%$. Таким образом, были получены удовлетворительные результаты при достижении необходимой температуры реакционной среды. На основании полученных результатов была показана эффективность используемых методов управления технологическим аппаратом печи разложения флюоритового концентрата.

Заключение

1. Разработана статическая модель теплового процесса барабанной печи разложения ФК, которая на основании уравнений материального и теплового баланса позволяет производить расчет уставок для зон нагрева барабанной печи.

2. Разработана динамическая модель теплового процесса, описывающая процессы нагрева и движения с точностью до 5%.

3. Синтезирована структурная схема системы согласованного управления подсистемами нагрева и вращения барабанной печи на основе современных вычислительных устройств, позволяющая вести технологический процесс с учетом изменения всех измеряемых параметров объекта управления и производить адаптацию регуляторов температуры нагревательных зон в соответствии с изменением параметров передаточных функций зон нагрева барабанной печи.

4. Разработан алгоритм идентификации параметров передаточной функции зон нагрева барабанной печи, позволяющий в процессе работы производить адаптацию регуляторов по определённым параметрам объекта управления.

5. Создана экспериментальная установка, позволяющая проводить исследования тепловых процессов и процессов движения РС в барабанной печи.

Публикации по теме диссертации

1. Букреев В.Г., Цхе А.В. Статическая тепловая модель барабанной печи// Известия Томского политехнического университета. Т. 307. Томск: Изд. ТПУ, 2004. № 5. С. 110-113

2. Букреев В.Г., Цхе А.В. Система моделирования температурных процессов в барабанной печи на основе TRACE MODE // Материалы международной научно-технической конференции «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы». Томск, 3-5 сент. 2003. Томск: Изд. ТПУ, 2003. С. 151-154.

3. Кладиев С.Н., Букреев В.Г., Руль А.И., Кокорев С.В., Цхе А.В. Моделирование технологических режимов работы промышленного оборудования// Межвузовская конференция «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях». Бийск, 2003. С. 71-73.

4. Кладиев С.Н., Букреев В.Г., Руль А.И., Кокорев С.В., Цхе А.В. Моделирование нечеткого регулятора температуры нагрева технологической среды// Межвузовская конференция «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях». Бийск, 2003. С. 73-79.

5. Кокорев С.В., Букреев В.Г., Цхе А.В. Моделирование работы асинхронного привода с тиристорным преобразователем напряжения// Современные техника и технологии: Труды десятой юбилейной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и

молодых учёных, посвященной 400-летию г. Томска: В 2 т. Томск, 29 марта – 2 апреля 2004. Томск: Изд. ТПУ, 2004. С. 247-248.

6. Кокорев С.В., Кладиев С.Н., Букреев В.Г., Цхе А.В. Регулирование температуры в греющей камере печи при помощи нечеткой логики// Технология и автоматизация атомной энергетики (ТААЭ-2005): Материалы отраслевой научно-технической конференции - Северск, 17-20 мая 2005 . Северск, 2005. С. 54.

7. Цхе А.В. Система комбинированного управления нагревом барабанной печи разложения флюоритового концентрата// Технология и автоматизация атомной энергетики (ТААЭ-2006): Материалы отраслевой научно-технической конференции. Северск, 22-26 мая, 2006. С. 30.

8. Цхе А.В., Букреев В.Г., Пищулин В.П., Трухин Ю.В. Стабилизация температурных режимов барабанной печи электротехнического комплекса производства фтороводорода// Изв. вузов Электромеханика : Изд. ЮРГТУ, 2006. № 3. С. 75-78

9. Цхе А.В./Св. о рег. программы для ЭВМ №2006612544 / Задание регуляторов температуры электронагрева барабанной печи // 2006.

Личный вклад автора

Две работы написаны автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автору принадлежит: разработка статической тепловой модели [1] (75%), разработка компьютерной математической модели [2-4] (40%), разработка программного обеспечения [5, 6] (45%), разработка динамической компьютерной модели и алгоритма управления электротехническим комплексом [8] (75%).