

На правах рукописи



**Туз Андрей Александрович**

**Управление технологическим процессом  
измельчения в шаровой мельнице в  
цикле подготовки питания флотации на  
основе нечетко-определенных  
импульсных моделей**

05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами  
и производствами (химическая технология; нефтехимия и нефтепереработка;  
биотехнология)

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва 2017**

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация производственных процессов» Новомосковского института (филиала) ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Научный руководитель: **Пророков Анатолий Евгеньевич** кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Вычислительная техника и информационные технологии» Новомосковского института (филиала) ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Официальные оппоненты: **Матвеев Юрий Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные вычислительные машины» ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет (ТвГТУ)»

**Бобков Сергей Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ)»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

Защита состоится «14» декабря 2017 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.204.03 при РХТУ им. Д. И. Менделеева (125047 г. Москва, Миусская пл., д. 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Менделеева и на сайте <http://diss.muctr.ru/author/202/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.204.03



Женса А.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Актуальность работы обусловлена повышением требований к качеству работы систем управления технологическими процессами промышленных предприятий, обладающих высокой энергоемкостью. Многочисленные исследования показывают, что важную роль в процессе управления технологическими процессами играет способность прогнозировать ход протекания процесса и возможность определять на этой основе управляющие воздействия. Поэтому для повышения качества работы системы автоматического управления необходимо применять методы проектирования, основанные на использовании регуляторов с предсказанием. Расчет данного типа регуляторов можно осуществлять на основе прогнозирующих нечетко-определенных импульсных моделей оценки состояний системы. Объектом исследования в работе является процесс измельчения в шаровой мельнице бадделейт-апатит-магнетитовых руд (БАМР) в цикле подготовки питания флотации, следующего, после стадии железорудного производства АО «Ковдорский горно-обогатительный комбинат».

Вопросы автоматизации и оптимизации процессов дробления и измельчения отражены в трудах Вердияна М. А., Егорова А.Ф., Марюты А. Н., Тихонова О. Н., Олейникова В. А., Козина В. З, Улитенко К. Я., Андреева Е. Е., Андреева С. Е., Линча А. Д., Хорста В.Е. и др.

Существенный вклад в теории автоматического управления технологическими процессами внесла школа академика Кафарова В.В., и его учеников. Используя данные результаты, можно повысить качество систем управления процессами измельчения, в результате чего добиться большего выхода готового товарного концентрата, при текущем уровне затрат.

**Целью работы** является повышение производительности процесса измельчения и классификации в цикле подготовки питания флотации, путем разработки системы автоматического управления на основе прогнозирующих нечетко-определенных импульсных моделей оценки состояния системы.

Для реализации поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие **задачи**:

- Разработка системы оценки параметров технологического процесса измельчения, учитывающей минеральный состав сырья.

- Разработка математической модели технологического процесса измельчения и классификации с применением нейро-нечетких сетевых моделей.

- Обоснование применения нечетко-определенных импульсных моделей для оценки состояний технологической системы.

- Разработка функциональной структуры системы управления технологическим процессом на основе индекса оценки качества продукта.

- Апробация разработанной системы управления технологическим процессом измельчения.

**Научная новизна:**

1. Разработана система оценки параметров технологического процесса измельчения, учитывающая минеральный состав сырья.

2. Разработана математическая модель технологического процесса измельчения и классификации с применением нейро-нечетких сетевых моделей.

3. Разработана нечетко-определенная импульсная модель оценки состояния системы замкнутого цикла мокрого измельчения с классификаторами в цикле подготовки питания флотации.

4. Разработан алгоритм управления контуром мокрого измельчения на основе нечетко-определенных импульсных моделей оценки состояния системы.

5. Предложена двухуровневая система автоматического управления контуром мокрого измельчения. На нижнем уровне осуществляется регулирование технологическими параметрами контура мокрого измельчения. Верхний уровень управления формирует задание для нижнего уровня. Данная система автоматического управления позволяет учитывать изменение свойств исходного сырья.

**Практическая значимость:**

Разработана методика оценки параметров технологического процесса измельчения, учитывающая минеральный состав сырья.

Разработана методика построения модели управления контуром мокрого измельчения на основе прогнозирующих нечетко-определенных импульсных моделей оценки состояния системы.

Разработана система автоматического управления контуром мокрого измельчения, которая может быть рекомендована к использованию в промышленных технологических процессах.

**Достоверность результатов исследования** подтверждается результатами проверки на адекватность разработанных моделей и результатами проведенных экспериментов функционирования разработанной системы автоматического управления.

**Личный вклад автора** заключается в непосредственном участии в

постановке задач исследования, получении исходных данных, в проведении основного объема теоретических и экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, анализе и оформлении результатов работы в виде научных публикаций и докладов на научных конференциях.

**Апробация работы:** V Международная научная конференция «Фундаментальные проблемы системной безопасности». Елец, 2014; Международная научно-техническая конференция «Наука и образование». Мурманск, 2014; Школа-семинар молодых ученых «Фундаментальные проблемы системной безопасности». Елец, 2014.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика оценки состояний технологического процесса измельчения, учитывающая минеральный состав сырья.

2. Математическая модель технологического процесса измельчения и классификации с применением нейро-нечетких сетевых моделей.

3. Нечетко-определенная импульсная модель оценки состояния контуром мокрого измельчения, которая основана на использовании аппарата нечетких множеств.

4. Система автоматического управления контуром мокрого измельчения.

**Публикации:** по теме диссертации опубликовано 9 работ, отражающих основные результаты работы, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 3 статьи в рецензируемых российских научных журналах, тезисы 3-х докладов.

**Структура и объем работы:** диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и списка литературы. Работа изложена на 208 страницах машинописного текста, содержит 28 таблиц, 83 рисунка, 1 приложение. Список литературы включает 185 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** отражена и обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цель и задачи исследования.

**В первой главе** выполнен обзор научно-технической литературы по технологическим процессам измельчения в промышленности, рассмотрены проблемы управления технологическими процессами на горно-обогатительных предприятиях. Рассмотрены технологические особенности управления процессом мокрого измельчения. Проанализирована динамика процесса измельчения, проходящая в шаровой барабанной мельнице. Рассмотрены основные способы измельчения и разрушения твердого минерала до

необходимых размеров частиц. Показаны и проанализированы существующие циклы измельчения, применяемые в промышленном производстве. Установлены зависимости эффективности процесса мокрого измельчения от ряда конструкционных и технологических параметров.

**Вторая глава** посвящена разработке и исследованию математических моделей, используемых в задачах оценки состояний технологического процесса измельчения, представленного на рисунке 1.

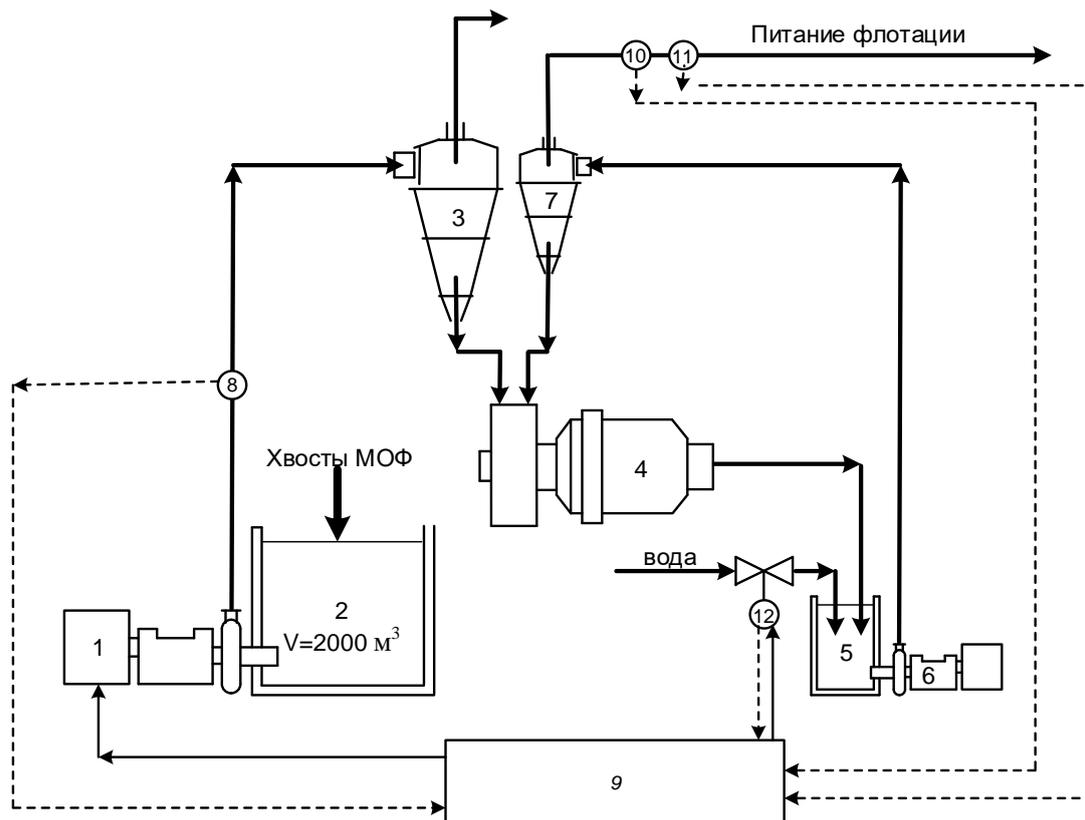


Рисунок 1 - Технологический процесс измельчения

Насосом позиция (поз.) 1 из аккумулирующей емкости (поз. 2) технологические хвосты железорудного производства магнито-обогатительной фабрики (МОФ), в состав которых входят различные минералы БАМР, подаются в виде пульповой смеси на обесшламливающий гидроциклон (поз. 3). Пески с которого направляются в шаровую мельницу (поз. 4), где происходит процесс измельчения. Слив с мельницы (поз. 4) направляется в мельничный зумпф (поз. 5) и затем с помощью насоса (поз. 6), подается на классифицирующий гидроциклон (поз. 7). Пески с которого идут обратно в мельницу, а слив является впоследствии исходным питанием флотации. Контроль крупности продукта осуществляется прибором измерения крупности (поз. 10). Контроль плотности продукта осуществляется плотномером (поз. 11). Плотность продукта

регулируется подачей оборотной воды в мельничный зумпф клапаном (поз. 12).

Для исследуемого объекта, характеризуемого наличием неопределенностей, связанных с отсутствием или неполнотой исходной информации, анализ существующих моделей оценки состояний показал, что в условиях недостатка знаний о протекании технологического процесса измельчения необходимо использовать дискретные нечетко-определенные модели состояния. В этом случае существует возможность построить сравнительно точные модели, учитывая, что теоретические выкладки отсутствуют, либо громоздки, или сложны.

В процессе работы рассмотрены закономерности измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд.

Определена роль расхода воды в технологический процесс измельчения и классификации, а также необходимая степень заполнения мельниц шарами.

Математическая модель процесса измельчения представлена в виде ячеечной модели, состоящей из каскада трех смесителей, согласно рисунку 2.

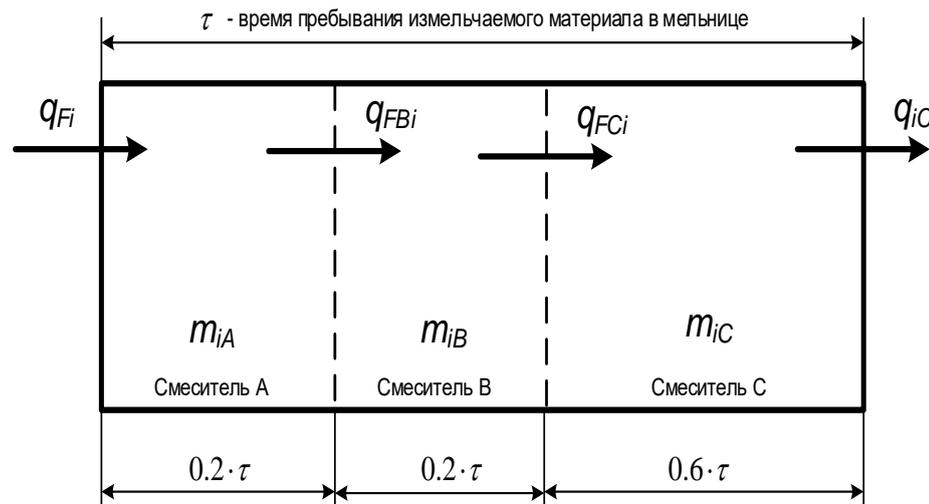


Рисунок 2 - Представление процесса измельчения в виде каскада из трех смесителей

Уравнения материального баланса для трех смесителей, соответствующие данной модели, имеют вид

$$\begin{aligned}
 \frac{dm_{iA}}{dt} &= \frac{f_{iA}}{\tau_A} - s_i m_{iA} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jA} - \frac{m_{iA}}{\tau_A} \\
 \frac{dm_{iB}}{dt} &= \frac{f_{iB}}{\tau_B} - s_i m_{iB} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jA} - \frac{m_{iB}}{\tau_B} \\
 \frac{dm_{iC}}{dt} &= \frac{f_{iC}}{\tau_C} - s_i m_{iC} + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} s_j m_{jB} - \frac{m_{iC}}{\tau_C}
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $m_{iA}, m_{iB}, m_{iC}$  – масса  $i$ -ой фракции (класса) крупности, находящегося соответственно в смесителе  $A, B, C$ ;

$f_{iA}, f_{iB}, f_{iC}$  – масса  $i$ -ой фракции (класса) крупности на входе соответственно в смесители  $A, B, C$ ;

$\tau_A, \tau_B, \tau_C$  – время пребывания в данном смесителе;

$b_{ij}$  – функция разрушения, определяющая переход материала  $j$ -го класса в  $i$ -ый класс крупности;

$s_i, s_j$  – функция отбора, определяющая скорость разрушения соответственно  $i$ -го и  $j$ -го класса крупности.

Значения коэффициентов разрушения  $b_{ij}$  и отбора  $s_i, s_j$  зависят от минералогического состава исходного сырья и шаровой загрузки мельницы и аппроксимируются с применением нейро-нечетких сетей.

Для решения системы дифференциальных уравнений (1) в работе предложен численный предиктор-корректорный метод Адамса четвертого порядка.

**Третья глава** посвящена решению задачи моделирования процесса измельчения, для прогнозирования функции разрушения  $b_{ij}$  (уравнение 1), зависящей от физико-механических свойств рудного тела и его состава, и коэффициентов  $s_i, s_j$ , определяющих функцию отбора, зависящих от свойств рудного тела и от состояния шаровой загрузки.

В работе предлагается для определения функциональных зависимостей для функций разрушения и отбора использовать нейро-нечеткие сети архитектуры adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) с применением аппарата нечеткой логики. При этом подстраивание функций принадлежности осуществляется с применением нейросетей.

На рисунке 3 представлена нейро-нечеткая сеть для прогноза функции разрушения и отбора материала.

На вход нейро-нечеткой сети для прогнозирования функции разрушения подается минералогический состав, выходом сети будет являться коэффициент разрушения  $b_{ij}$ .

На вход нейро-нечеткой сети для прогноза функции отбора подается тип руды в соответствии с ее обогатимостью, вторым параметром будет являться загрузка мельницы  $\phi_{III}, \%$ .

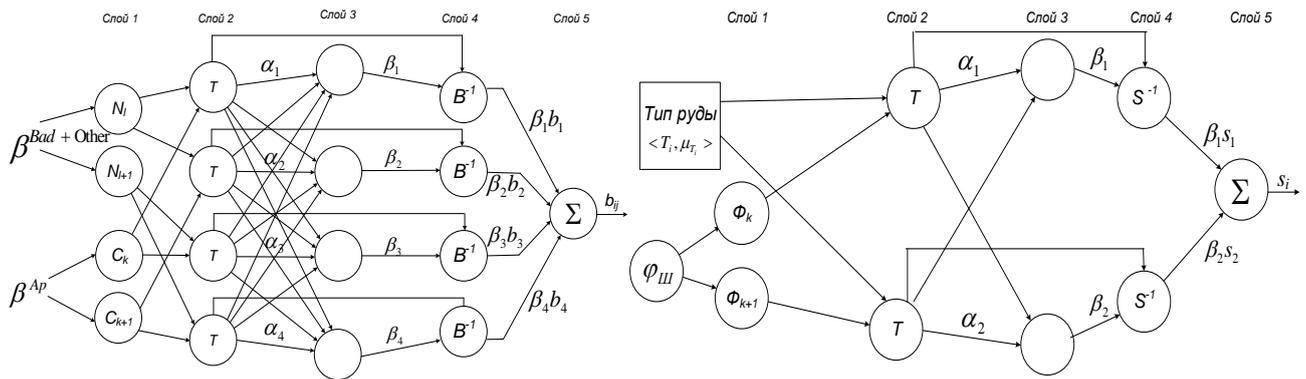


Рисунок 3 - Структура нейро-нечеткой сети для прогнозирования функции разрушения  $b_{ij}$  и функции отбора материала  $S_i$

Функции принадлежности терм-множеств входных лингвистических переменных имеют сигмоидный вид:

$$\mu_l(x) = \frac{1}{1 + \exp(c \cdot (x - d))} \quad (2)$$

Для обучения данной нейро-нечеткой сети осуществляется настройка параметров функций принадлежности терм-множеств выходной переменной  $c$ ,  $d$ , при которой минимизируется функция ошибки системы  $E(c, d) = \frac{1}{2} \cdot [b(c, d) - b^*]^2$ , где  $b(c, d)$  – прогнозное нейро-нечеткой сетью значение коэффициента  $b$ ;  $b^*$  – значение коэффициента  $b$ , полученное в результате идентификации модели процесса измельчения.

В цикле подготовки питания флотации следующим этапом после измельчения, является процесс классификации. В модели процесса классификации массы частиц  $i$ -ой фракции крупности входного потока классифицирующего аппарата связаны линейной зависимостью с массами частиц  $i$ -ой фракции крупности потока готового продукта измельчения и потока песков классификатора:

$$m_i^{zom} = c_i \cdot m_i^{изм} \quad m_i^{неск} = (1 - c_i) \cdot m_i^{изм} \quad (3)$$

где  $c_i$  – элементы функции разделения  $C$ .

Для прогнозирования функции разделения предлагается также использовать нейро-нечеткую сеть с архитектурой ANFIS, которая аналогична нейро-нечеткой сети для прогноза функции отбора материала, однако, вторым параметром, подаваемым на вход нейро-нечеткой сети, вместо загрузки мельницы будет расход воды в процесс классификации  $Q_{воды}$ , м<sup>3</sup>/ч.

Ниже приводится информационная система оценки параметров процесса



гидроциклона  $q_{геск}$  обратно в процесс измельчения суммируется на входе в мельницу с исходным сырьем  $q_i^{сх}$ .

По результатам работы модели определяется прогнозное значение индекса оценки качества готового продукта измельчения. Значение индекса оценки качества по переменным состояния для конкретного момента времени формирует импульсную модель, которая используется для прогноза состояния процесса и выбора управляющих воздействий. Как управляющие воздействия используются две переменные: расход питания на мельницу и расход воды в мельничный зумпф.

В работе была достигнута степень точности системы оценки параметров на уровне 5% согласно статистическим данным работы участка подготовки питания флотации апатито-бадделеитовой обогатительной фабрики (АБОФ) Ковдорского ГОКа. На графиках (рис. 5) представлено прогнозное (по модели) и измеренное изменение содержание определяющего класса крупности +0,071 мм в сливе классификатора при изменении расхода сырья на 7%.

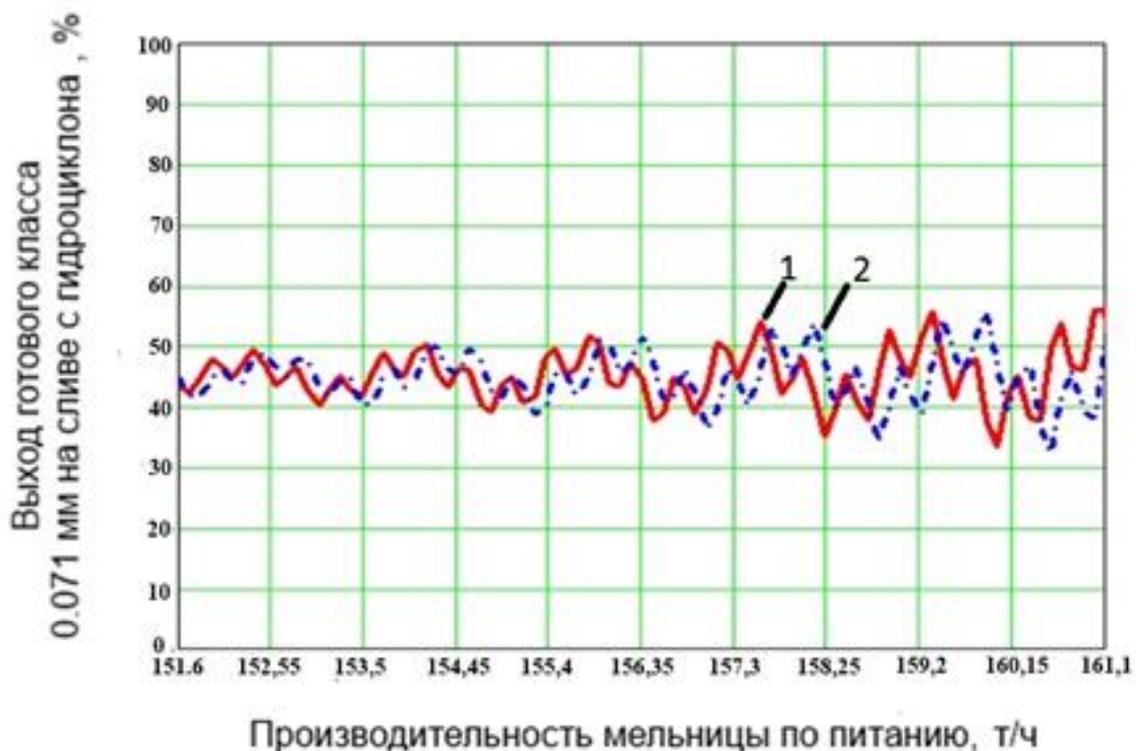


Рисунок 5 – Изменение содержания готового класса крупности 0,071 мм (1-экспериментальные данные, 2-результаты расчета по модели)

**В четвертой главе** для разработки системы автоматического управления был проведен анализ процесса измельчения и классификации, как объекта управления, результаты которого приведены на рисунке 6.

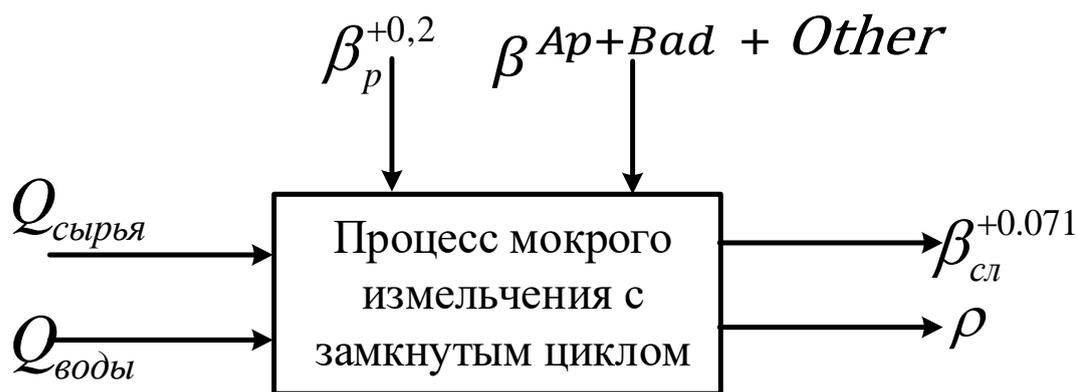


Рисунок 6 - Входные воздействия и выходные параметры агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом работы

Управляемые переменные:

- крупность продукта измельчения и классификации  $\beta_{сл}^{+0.071}$  ;
- плотность продукта измельчения и классификации  $\rho$  .

Управляющие воздействия:

- расход исходного сырья  $Q_{сырья}$  ;
- расход воды в мельничный зумпф  $Q_{воды}$  .

Возмущающие воздействия:

- крупность исходного сырья  $\beta_p^{+0,2}$  ;
- минералогический состав исходного сырья  $\beta^{Ap+Bad+Other}$  .

Совокупность критериев оценки качества продукта процесса измельчения и классификации в работе предложено именовать как центр оценки качества продукта. Качество продукта находится во взаимосвязи с регламентными режимами и напрямую зависит от максимального соответствия лучшим регламентным режимам ведения технологического процесса. Отклонение по качеству продукта говорит о выходе процесса из области лучших регламентных режимов.

Работу технологического процесса измельчения и классификации можно представить как последовательную смену его различных состояний. При этом лучшие регламентные состояния будут формировать область центра оценки качества. Удаленность текущего состояния технологического процесса от центра оценки качества в работе предложено учитывать через индекс оценки качества. Графическая интерпретация индекса и центра оценки качества продукта приводится на рисунке 7.

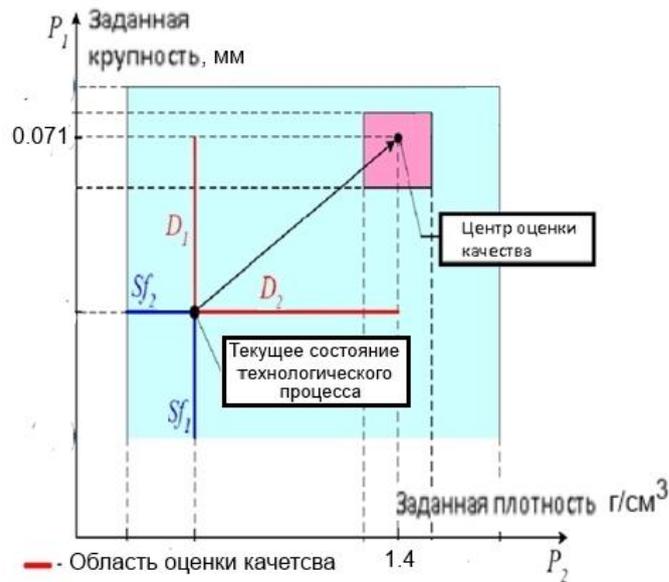


Рисунок 7 - Интерпретация индекса и центра оценки качества

Индекс оценки качества продукта строится на основе двух оценок: степени нечеткого включения ситуации  $\tilde{s}_i$  в ситуацию  $\tilde{s}_j$  и обозначается  $\nu(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j)$  (нечеткая импликация) и определяется выражением:  $\nu(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) = \& \nu(\mu_{S_i(T)}, \mu_{S_j(T)})$ , здесь  $\nu(\mu_{S_i(T)}, \mu_{S_j(T)}) = \& (\mu_{\mu_{S_i(T)}}(E_k) \rightarrow \mu_{\mu_{S_j(T)}}(E_k))$ ; и степени нечеткого равенства  $In(\tilde{s}^*)_{\tilde{s}_0} = \nu(\tilde{s}^*, \tilde{s}_0) \& \nu(\tilde{s}_0, \tilde{s}^*)$ . Степень нечеткого равенства определяет индекс оценки качества продукта.

Задача управления заключается в том, чтобы направить режим ведения технологического процесса в область лучших регламентных состояний.

В блоке оптимизации задания, в соответствии с изменениями минералогического состава, полученными системой оценки параметров модели, осуществляется оптимизация задания, с учетом индекса оценки качества (рис.8).

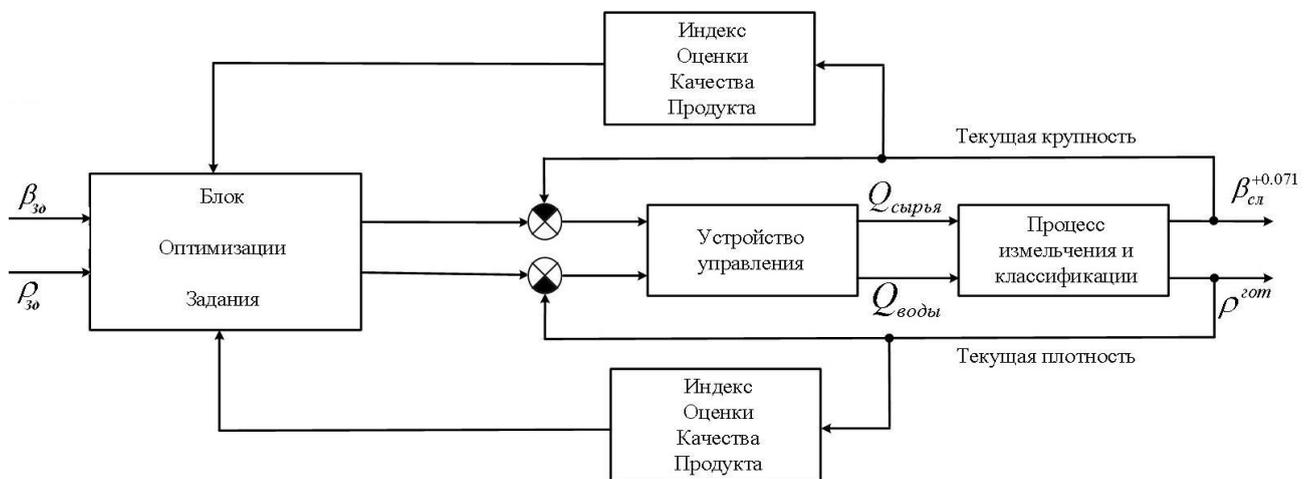


Рисунок 8 - Структурная схема системы автоматического управления

Переменные состояния: - фракционный состав продукта -  $m_{iA}$ ,  $m_{iB}$ ,  $m_{iC}$  - в уравнениях состояния это  $x_k$  - для продукта.

Переменные управления -  $u_k \{k=1,2\}$ :

1. расход сырья;
2. расход воды в мельничный зумпф.

На рисунке 9 приводится функциональная структура работы системы автоматического управления процессом измельчения.

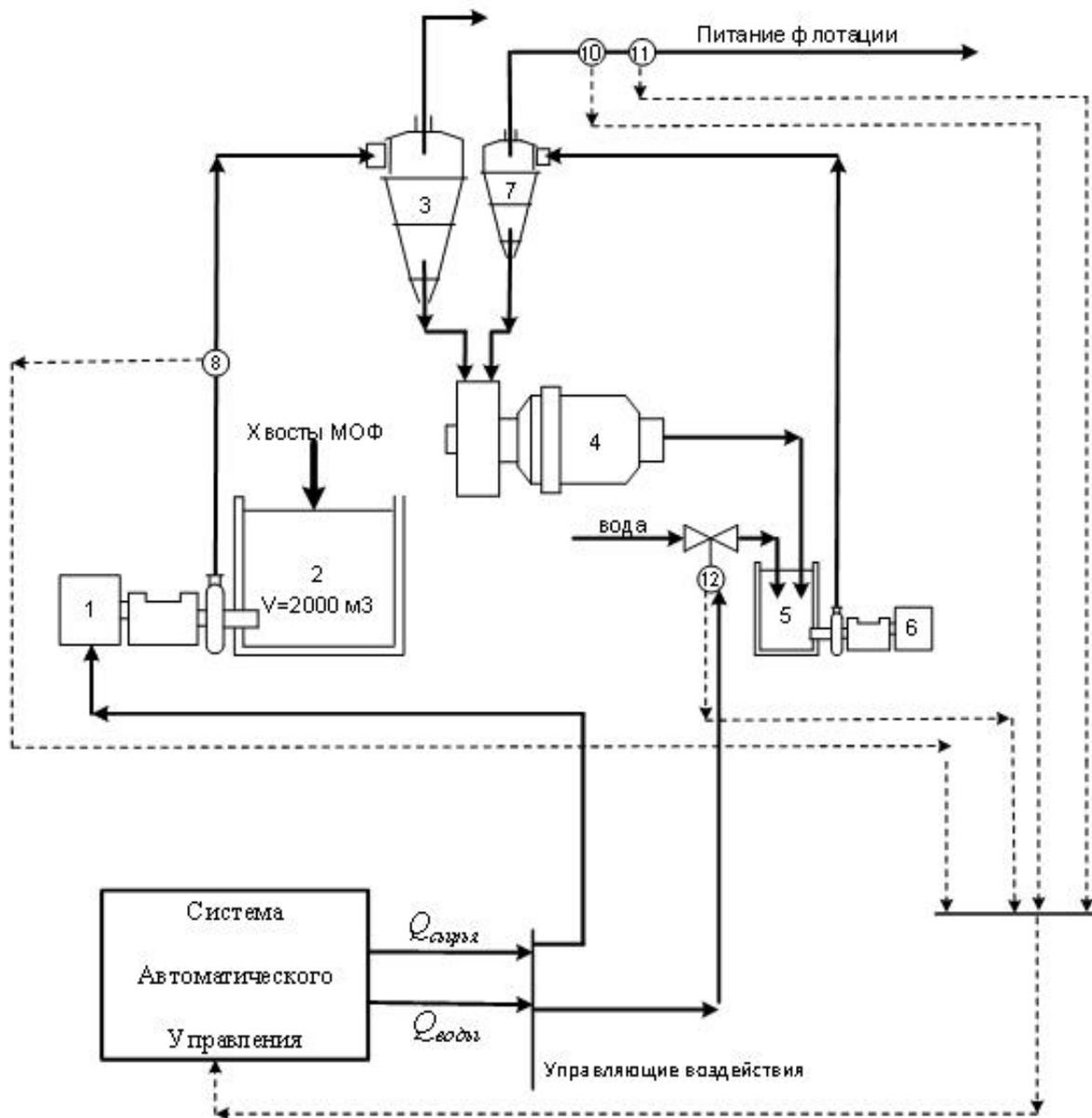


Рисунок 9 - Обобщенная функциональная структура работы системы управления технологическим процессом измельчения

Устойчивые процессы представлены режимом конечных импульсных характеристик (КИХ).

$$z_k = b_k + \sum_{i=1}^n H_i u_{k-i} \quad (4)$$

где  $\{H_i\}_{i=1}^n$  – коэффициенты импульсной характеристики, составляющие смещения оценочного модуля;  $b_k$  – расхождения между прогнозируемым и фактическим выходами.

После сбора информации производится корректировка на основе нечеткого вывода центра оценки качества продукта  $r_k$  по переменным состояниям, назначается величина индекса оценки качества продукта  $\text{Ind}^{zd}(r_{k+1})$  – заданное значение (выбирается исходя из максимума индекса оценки качества продукта) – уставка для регулятора, по которой и осуществляется минимизация выбором управляющих воздействий. Определяются новые значения  $\text{Ind}(z_{k+1})$ . На основе этих определений делается оценка состояний и, далее, осуществляется процедура оптимизации.

С помощью модели КИХ регуляризованная задача отслеживания выхода с входными ограничениями сформулирована следующим образом:

$$\min_{\{z,u\}} \phi = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \|\text{Ind}(z_{k+1}) - \text{Ind}^{zd}(r_{k+1})\|_{Q_z}^2 + \|\Delta u_k\|_S^2 \quad (5)$$

$$\text{где} \quad z_k = b_k + \sum_{i=1}^n H_i u_{k-i} \quad k=1, \dots, N \quad (6)$$

$$u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max} \quad k=0, \dots, N-1 \quad (7)$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u_k \leq \Delta u_{\max} \quad k=0, \dots, N-1 \quad (8)$$

$$z_k \leq z_{\max} + \eta_k \quad k=1, \dots, N \quad (9)$$

$$z_k \geq z_{\min} - \eta_k \quad k=1, \dots, N \quad (10)$$

При этом  $\Delta u_k = u_k - u_{k-1}$  и  $Q_z, S$  – это веса регуляризации, а  $\|z_{k+1} - r_{k+1}\|_{Q_z}^2$  является общим представлением норм метода наименьших квадратов по весу.

$\min \phi - \min$  – ключевое слово,  $\phi$  – имя экстремума.

$Q_z, S$  – веса, которые задают приоритеты переменным, оказывая влияние на экстремум.

Назначение системы состоит в моделировании процесса доизмельчения бадделейт-апатит-магнетитовых руд путем моделирования отношений между несколькими входными и выходными переменными для обеспечения эффективного механизма управления.

Результаты проведенных в работе экспериментов представлены на

рисунках 10 и 11.

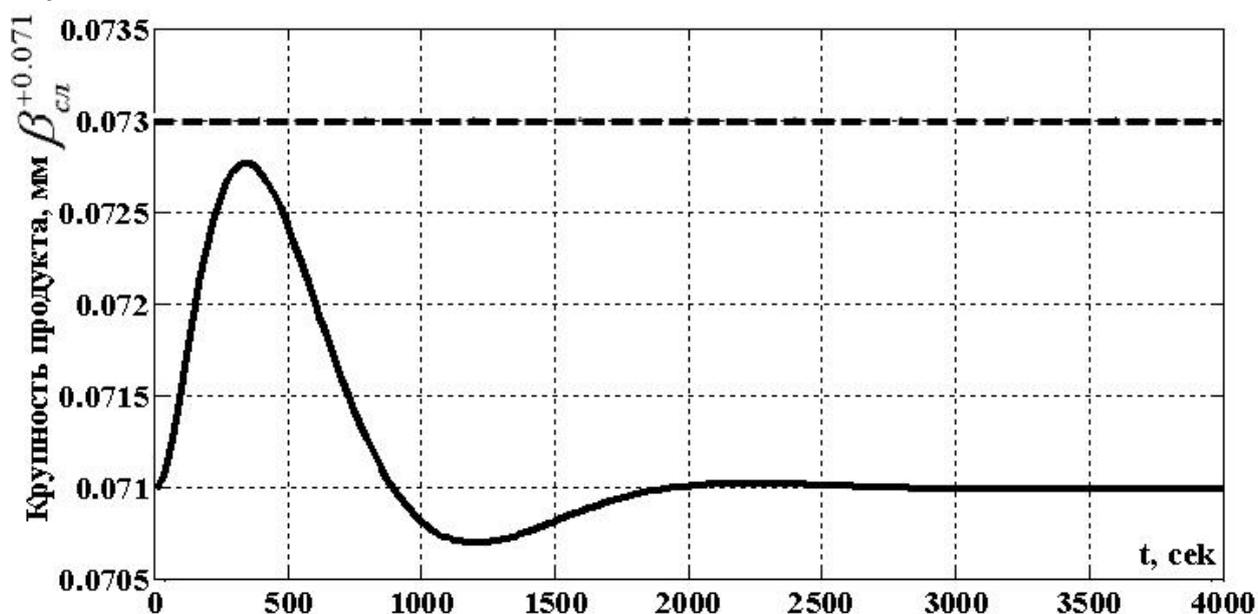


Рисунок 10 – Отклик системы автоматического управления на возмущение по составу сырья

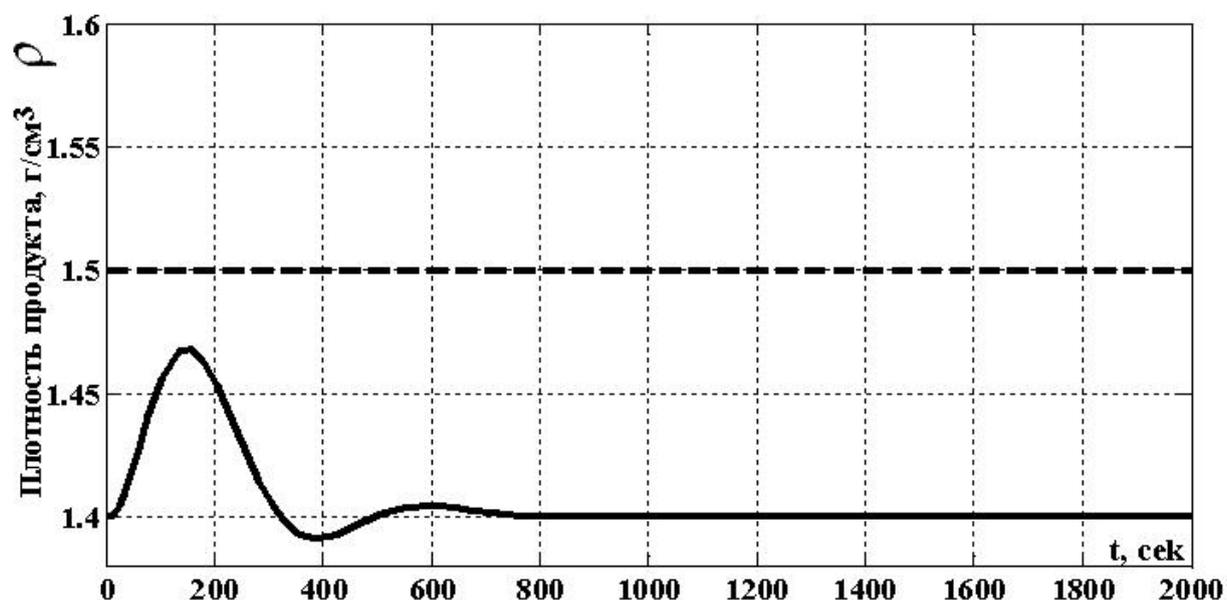


Рисунок 11 – Отклик системы автоматического управления на возмущение по плотности

Проведенные в работе эксперименты показали устойчивость созданной системы автоматического управления, при этом динамическая ошибка регулирования не превысила 5%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- На основании выполненного обзора современных методов управления замкнутой схемой измельчения были сформулированы цели и задачи исследования.

- Проанализированы математические модели, используемые в задачах моделирования технологических процессов.

- Разработана математическая модель технологического процесса измельчения и классификации с применением нейро-нечетких сетевых моделей.

- Разработана система оценки параметров технологического процесса измельчения, учитывающая минеральный состав сырья.

- Обосновано применение нечетко-определенных импульсных моделей для оценки состояний системы.

- Разработана функциональная структура и алгоритм работы системы управления технологическим процессом на основе индекса оценки качества продукта.

- Проведена апробация разработанной системы управления технологическим процессом измельчения бадделеит-апатит-магнетитовых руд.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК*

1. Туз А.А., Санаева Г.Н., Пророков А.Е., Богатиков В.Н. Нечетко-логический подход к моделированию процесса измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом Акционерного Общества «Ковдорский горно-обогатительный комбинат» // Интернет-журнал «Науковедение» Том 8, №1 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/79TVN116.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/79TVN116

2. Туз А.А., Санаева Г.Н., Пророков А.Е., Богатиков В.Н., Кулаков А.Г. Системы автоматического регулирования агрегата мокрого измельчения с замкнутым циклом на основе нечеткоопределенных моделей // Интернет-журнал «Науковедение» Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/93TVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/93TVN216

3. Туз А.А., Санаева Г.Н., Пророков А.Е., Богатиков В.Н. Управление технологическими процессами измельчения и основные направления их автоматизации // Интернет-журнал «Науковедение» Том 8, №2 (2016)

(доступ свободный). Загл с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/92TVN216

*Статьи в других рецензируемых изданиях и материалы научных конференций:*

4. Туз А.А., Браун-Аквей В., Лемпого Фаргор, Кулаков А.Г., Богатиков В.Н. Управление с прогнозирующими моделями. Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. - 3/2015(29). - Вып. 6. - С. 151-161.

5. Туз А.А., Богатиков В.Н. Построение системы адаптивного управления процессом измельчения апатито-бадделеитового концентрата участка подготовки питания флотации ОАО «Ковдорский ГОК». Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. - 5/2014(24). - Вып. 5. - С. 226-238.

6. Туз А.А. Богатиков В.Н. Математическая модель технологического процесса измельчения апатито-бадделеитового концентрата в закрытой шаровой мельнице участка подготовки питания флотации Ковдорского ГОКа // *Фундаментальные проблемы системной безопасности: Материалы школы-семинара молодых ученых (20-22 ноября 2014)*. – Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2014. – 62-68 с.

7. Туз А.А. Шпрехер Д.М. Богатиков В.Н. Нечеткая модель ресурсного обеспечения технологической безопасности процесса подготовки питания флотации ОАО «Ковдорский ГОК» // *Материалы V Международной научной конференции «Фундаментальные проблемы системной безопасности»*. Елец: ЕГУ им. И.А. Бунина, 2014. – 291-296 с.

8. Туз А.А. Богатиков В.Н. Оценка остаточного ресурса для целей управления технологической безопасностью процесса подготовки питания флотации ОАО «Ковдорский ГОК» *«Наука и образование – 2014. [Электронный ресурс]: Материалы междунар. науч.- техн. конф. (24 - 28 марта 2014 г.)*. – Мурманск: МГТУ, 2014. –423-427 с.

9. Туз А.А., Богатиков В.Н. Построение модели процесса измельчения в агрегате непрерывного действия с замкнутым циклом ОАО «Ковдорский ГОК» с применением нейросетевых моделей. Труды Кольского научного центра РАН. Информационные технологии. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. - 5/2013(18). - Вып. 4. - С. 189-198.