

**ПИРМАТОВ ДЕНИС СЕРГЕЕВИЧ**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЖИГА ОКАТЫШЕЙ  
НА ОСНОВЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

-

Работа выполнена в Старооскольском технологическом институте  
им. А.А. Угарова (филиале) ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС» (СТИ НИТУ МИСиС)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Кривоносов Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Дубровский Сергей Андреевич,  
ФГБОУ ВПО Липецкий государственный  
технический университет (ЛГТУ), зав. кафедрой  
металлургии

кандидат технических наук, доцент  
Коровин Константин Валерьевич,  
ФГБОУ ВПО Воронежский государственный  
технический университет (ВГТУ), доцент кафедры  
электропривода, автоматике и управления в  
технических системах

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО Московский государственный  
горный университет (МГГУ)

Защита состоится « 26 » ноября 2013 года в 13-30 на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» по адресу: 302020, РФ, г. Орел Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 212.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПС «Госуниверситет – УНПК».

Автореферат разослан « 26 » октября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.182.01  
кандидат технических наук, доцент

В.Н. Волков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Производственные мощности предприятий металлургической и горнорудной промышленности год от года повышаются. Для выплавки стали и выпуска горячебрикетированного железа в настоящее время широко используются окатыши. Важной стадией производства окатышей является тепловая обработка в конвейерной обжиговой машине (ОМ). ОМ - основные агрегаты фабрик окомкования, и обжиг окатышей в таких машинах требует существенных затрат энергии, что приводит к потреблению значительного количества природного газа. Стоимость энергоносителей постоянно растет, поэтому необходимость эффективного использования топлива в ОМ не вызывает сомнения.

Ведение технологического процесса в рамках регламента является основной задачей эксплуатационного персонала обжиговой машины. Существует ряд факторов затрудняющих поддержание в зонах машины оптимального режима, что может привести к нерациональному расходованию природного газа. Основные из них отсутствие непосредственного оперативного контроля состояния слоя окатышей по зонам в процессе обжига и изменение параметров сырья, поступающего на обработку.

Одним из возможных путей повышения технико-экономических показателей ОМ является дальнейшая модернизация действующей автоматизированной системы управления процессом обжига окатышей в направлении оптимизации технологического режима с использованием методов математического моделирования и современной теории автоматического управления.

Работа выполнена в рамках НИР: «Разработка методов повышения эффективности управления горно-металлургическими производствами на основе искусственного интеллекта» в соответствии с научным направлением Старооскольского технологического института (филиала) ФГАОУ ВПС «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (СТИ НИТУ МИСиС).

**Объект исследования** – технологический процесс обжига окатышей.

**Предмет исследования** – модели и алгоритмы управления режимами термообработки окатышей в зонах конвейерной обжиговой машины.

**Целью данного научного исследования** является снижения удельного расхода природного газа на обжиг окатышей в конвейерной обжиговой машине за счет повышения эффективности контроля и управления режимом термообработки. При этом должны соблюдаться требования технологического регламента.

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

- анализ и выявление путей повышения эффективности автоматизированного управления технологическим процессом обжига окатышей в конвейерной ОМ.

- разработка подсистемы статической оптимизации режима работы обжиговой машины. Выбор и формализация критерия оптимальности работы ОМ. Разработка статических математических моделей технологических зон ОМ. Разработка процедуры оптимизации установившегося режима термообработки в каждой из зон ОМ с учетом ограничений технологического регламента.

- разработка подсистемы стабилизации оптимального режима. Разработка динамических математических моделей нагрева и охлаждения слоя окатышей, а также газообразного теплоносителя. Разработка процедуры оценки неизмеряемой кажущейся

теплоемкости слоя и косвенного контроля неизмеряемой температуры слоя. Разработки алгоритма регулирования температуры окатышей с учетом ее изменения по высоте слоя.

- интеграция разработанной системы управления технологическим процессом в существующую АСУ ТП предприятия.

Модернизированная автоматизированная система управления технологическим процессом обжига окатышей в конвейерной обжиговой машине должна вести термообработку в режиме, обеспечивающем минимальные удельные затраты топлива на обжиг окатышей при заданной производительности.

### **Научная новизна**

1. Разработаны статические математические модели для зон обжиговой машины, структура которых основана на уравнениях газодинамики и теплообмена зернистого слоя, отличающиеся тем, что параметры моделей адаптированы к реальному процессу по результатам обработки экспериментальных данных, а их входами являются только результаты штатных измерений технологических величин.

2. На основе уравнений Т. Шумана для решения частной задачи теплообмена разработаны динамические математические модели изменения температур теплоносителя на выходе из слоя, а также температуры слоя окатышей на выходе каждой из зон обжиговой машины, отличающиеся учетом влияния кажущейся теплоемкости слоя.

3. Разработан наблюдатель, основанный на уравнениях состояния и отличающийся наличием дополнительной координаты, оценивающей неизмеряемое значение эквивалентного возмущения.

4. Разработаны алгоритмы управления процессом обжига окатышей в зонах ОМ, основанные на динамических математических моделях, наблюдателях и регуляторах состояния.

**Теоретическая значимость работы** состоит в разработке метода косвенного контроля основных характеристик слоя окатышей по зонам обжиговой машины с использованием наблюдателей состояния, а также в разработке процедур оптимизации процесса термообработки окатышей, которые обеспечивают определение и стабилизацию режима, оптимального по удельному расходу природного газа.

**Практическая значимость работы.** Предложенные в работе модели, алгоритмы, методы контроля, управления реализованы в составе специального программно-технического комплекса, ориентированного на практическое использование в рамках модернизированной автоматизированной системы управления процессом обжига окатышей в ОМ.

Использование результатов работы для решения прикладных задач управления процессом тепловой обработки в ОМ позволяет повысить эффективность установки за счет снижения удельных затрат природного газа на обжиг окатышей при сохранении регламентного качества продукции.

**Методы исследования.** В работе использованы методы системного анализа, координации систем, нелинейного программирования, математического моделирования, методы современной теории автоматического управления.

Методологическую и теоретическую основу диссертационной работы составили научные труды отечественных и зарубежных авторов в области теории газодинамики и теплообмена зернистого слоя, теории автоматического управления, математического программирования, оптимального управления, моделирования динамических процессов.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Статические математические модели зон обжиговой машины, входами которых являются только контролируемые параметры технологического процесса.
2. Процедура статической оптимизации режима, которая позволяет осуществлять поиск температур, давлений теплоносителя и температур слоев окатышей в группах зон ОМ, при которых обеспечивается снижение удельного расхода природного газа.
3. Динамические математические модели на основе уравнений Т. Шумана описывающие изменение температуры теплоносителя и слоя окатышей в зонах обжиговой машины.
4. Наблюдатель, оценивающий координаты состояния объекта и неизмеряемое значение возмущения - кажущуюся теплоемкость слоя. На основе наблюдателя построен регулятор состояния, стабилизирующий оптимальную температуру окатышей.
5. Структура программно-технического комплекса, обеспечивающего реализацию разработанных методов и алгоритмов в составе АСУ ТП обжиговой машины.

**Достоверность научных результатов** диссертационного исследования подтверждается использованием научно обоснованных методов математического моделирования процесса газодинамики и теплообмена в плотном слое, нелинейного программирования, классической и современной теории автоматического управления сравнением практических данных с результатами математического моделирования обсуждением полученных в работе результатов на международных, всероссийских и региональных конференциях; публикациями основных результатов исследования в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

### **Реализация и внедрение результатов работы.**

Основные теоретические и практические результаты, полученные при разработке автоматизированной системы управления процессом обжига окатышей в обжиговой конвейерной машине, рекомендованы для внедрения на Лебединском ГОКе.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Старооскольского технологического института (филиала) ФГАОУ ВПС «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (СТИ НИТУ МИСиС) в дисциплинах «Моделирование систем управления», «Автоматизация технологических процессов и производств».

### **Апробация работы.**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

Региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и соискателей (г. Старый Оскол, 2009 г.); Международной научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов «Образование, наука производство и управление» (г. Старый Оскол, 2009 г.); Региональной научно-технической конференции ОАО «ОЭМК» (г. Старый Оскол, 2010 г.); Всероссийской конференции «Новые технологии в научных исследованиях, проектировании и управлении, производстве НТ-2010» (г. Воронеж, 2010 г.); Международной научно-технической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия» (г. Липецк, 2010 г.); Международной научно-технической конференции «АПИР-15» (г. Тула, 2010 г.); Научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Днепропетровск, 2013 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах, в том числе 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ: в периодическом издании «Вестник Воронежского государственного технического университета» (г. Воронеж, 2010 г., Т.6. №5.); в периодическом издании «Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) - ГИАБ» (г. Москва, 2011 г. №8.); в периодическом электронном издании «Инженерный вестник Дона» (г. Ростов-на-Дону, 2013 г., №3.).

Вклад автора диссертации в работы, выполненные в соавторстве, состоит в постановке задач, разработке теоретических положений, а также в непосредственном участии во всех этапах исследований.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 112 наименований и 4 приложений. Основная часть работы изложена на 186 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок и 18 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность работы, представлены основные научные результаты, определены их научная новизна и практическая значимость, приведено краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** произведен обзор проблем управления процессом обжига окатышей в ОМ и существующих подходов к их решению. Определены приоритетные направления повышения эффективности режима работы ОМ, поставлена цель и обозначены задачи исследования.

Существенный вклад в исследования и совершенствование технологии обжига окатышей внесли ученые: Ю.С. Юсфин, Е.Ф. Вегман, Т.Н. Базилевич, Н.Ф. Пашков, О.М. Тодес, а также Г.М. Майзель, А.П. Буткарев, А.А. Буткарев, В.И. Клейн, Н.Н. Бережной, Ш. Маерчак, К. Мейер, Г. Шенк.

В области математического моделирования слоевых процессов работали: Т. Шуман, А. Миснар, М.Э. Аэров, Г. Гербер, В.Н. Тимофеев, Ю.Г. Ярошенко, Б.И. Китаев.

Вопросам построения наблюдателей и регуляторов состояния динамических систем посвящены работы Р. Калмана, Я.З. Цыпкина, К. Браммера, Р. Изермана, Коровина С.К., Фомичева В.В.

Обжиговая машина – это агрегат для передела сырых окатышей в обожженные. Термообработка слоя в зонах машины производится теплоносителем, нагретым до температуры обжига окатышей теплом от сжигания природного газа в зоне обжига и теплом охлаждающегося слоя. Эффективная работа ОМ обеспечивается достижением заявленного качества окатышей на выходе ОМ при минимальном расходе энергоресурсов на обжиг.

Анализ процесса упрочняющего обжига гранул в ОМ показал, что основные параметры термообработки можно разделить на измеряемые и неизменяемые. Изменяемыми являются параметры теплоносителя в зонах машины и сырых окатышей, загружаемых в машину, а неизменяемыми – параметры слоя, проходящего по зонам. В каждой из зон машины параметры слоя и теплоносителя должны соответствовать регламентным диапазонам. Основным параметром, определяющим качество обжига окатышей, является температура слоя. На процесс обжига действуют возмущения, обусловленные изменениями среднего диаметра гранул  $d_{cp}$ , скорости движения паллет

$v_n$ , средней влажности  $u_{ср}$ , и теплофизических свойств окатышей  $f$ . Результатом воздействия возмущающих факторов является колебания температуры окатышей в зонах ОМ.

Из-за отсутствия возможности непосредственного измерения температуры слоя окатышей, процесс обжига контролируют косвенно, измеряя температуру теплоносителя в зонах машины. При этом заявленное качество гранул обеспечивается удержанием температуры теплоносителя в зонах ОМ на значении, соответствующем середине регламентного диапазона температуры слоя окатышей. Анализ работы ОМ в таком режиме управления показал, что в большинстве случаев максимальная энергоэффективность не обеспечивается. Определение и поддержание оптимального режима обжига окатышей затруднено по следующим причинам:

1. Отсутствие возможности непосредственного контроля параметров слоя (температура, влажность).
2. Наличие неизмеряемых возмущающих факторов (порозность слоя, физико-химические превращения)

Существующие автоматизированные системы управления обжигом окатышей в ОМ обладают следующими основными недостатками: управляют процессом обжига слоя косвенно, стабилизируя параметры теплоносителя в зонах ОМ, или для своей работы требуют большое количество данных, которые в режиме нормальной эксплуатации ОМ не измеряются.

В данной диссертационной работе разрабатывается автоматизированная система управления, состоящая из подсистем статической оптимизации и стабилизации оптимального режима обжига окатышей в конвейерной обжиговой машине использующих в своей работе лишь данные штатных измерений параметров ОМ.

**Во второй главе** разработана система статической оптимизации режима работы конвейерной обжиговой машины.

Анализ работы ОМ показал, что оптимизация режима термообработки позволяет сократить удельные затраты природного газа, при сохранении количества и качества выпускаемых окатышей.

1. В качестве критерия эффективности работы всей обжиговой машины выбран удельный расход природного газа т.е. отношение расхода природного газа  $G_{пр}$  к потоку окатышей  $G_{ОК.ВХ}$ , входящих в ОМ за время  $T$ .

$$F = \frac{\int_0^T G_{пр}(t) dt}{\int_0^T G_{ОК.ВХ}(t) dt} \quad (1)$$

2. Анализ технологического процесса обжига окатышей в машине позволил выделить входные и выходные параметры моделей зон и секций. Эти параметры являются величинами, характеризующими слой и теплоноситель на входе и выходе из зоны, и включают температуры окатышей и теплоносителя, влажность слоя, перепад давления теплоносителя. Входы и выходы секций и зон связаны уравнениями газодинамики и теплообмена. Выходные характеристики слоя предыдущей секции или зоны являются входами последующей.

Для предотвращения переувлажнения, сминания, растрескивания и расплавления окатышей в задачу оптимизации введены ограничения по влажности, температуре слоя, а также скорости нагрева или охлаждения в каждой из зон.

3. Разработаны математические модели зон ОМ, позволяющие оценивать неизмеряемые параметры слоя в установившемся режиме работы машины. На основе уравнений Эргана и формулы Слихера, получено выражения для скорости  $V_0$  движения газов в слое.

$$V_0 = \frac{-150m \cdot a + \sqrt{(150m \cdot a)^2 + 7r \cdot b \cdot \frac{\Delta p_1}{1,3 \cdot H}}}{3,5r \cdot b} \quad (2)$$

где

$$a = \frac{(1-e)^2}{e^3 \cdot d^2}; \quad b = \frac{1-e}{e^3 \cdot d};$$

$\Delta p$  – перепад давления по высоте слоя окатышей;  $H$  – высота слоя окатышей;  $\mu$  – динамическая вязкость газа;  $\varepsilon$  – порозность слоя;  $d$  – эквивалентный диаметр окатышей;  $\rho$  – плотность газа.

Из условия теплового баланса с использованием  $V_0$  получены математические модели, связывающие температуру и влажность слоя на выходе из зоны с управляющими воздействиями и возмущениями. Для зон сушки и подогрева математические модели имеют вид системы уравнений (3).

$$\left\{ \begin{array}{l} V_0 = \frac{-150m \cdot a + \sqrt{(150m \cdot a)^2 + 7r \cdot b \cdot \frac{\Delta p}{1,3 \cdot H}}}{3,5r \cdot b}; \\ Q = V_0 \cdot S \cdot e \cdot \frac{L}{V_{II}} \cdot C_{ДГ} \cdot (\Theta_{ДГ.ВХ} - \Theta_{ДГ.ВЫХ}); \\ \Theta_{ОК.ВЫХ} = \Theta_{ОК.ВХ} + \frac{k \cdot Q \cdot V_{II}}{L \cdot G_{ОК.ВХ} \cdot \dot{C}_M}; \\ U_{ОК.ВЫХ} = U_{ОК.ВХ} - \frac{(1-k) \cdot Q \cdot V_{II}}{L \cdot G_{ОК.ВХ} \cdot I} \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $S$  – общая площадь постели окатышей, через которую прокачивается газ в секции;  $L$  – длина рассматриваемой секции;  $k$  – эмпирический коэффициент расхода тепла на нагрев окатышей, значение которого получено в результате обработки экспериментальных данных;  $V_{II}$  – скорость движения паллет;  $G_{ОК.ВХ}$  – расход сырья окатышей;  $\lambda$  – удельная теплота испарения воды;  $\Theta_{ДГ}$  – температура газа-теплоносителя;  $\Theta_{ОК}$  – температура окатышей;  $U_{ОК}$  – влажность окатышей;  $\dot{C}_M$  – кажущаяся теплоемкость материала слоя окатышей.

Математические модели остальных зон учитывают следующие особенности процесса обжига окатышей в ОМ:

- влага в окатышах зоны обжига практически отсутствует  $U \approx 0$ ;
- наличие дополнительного тепла  $Q_D$  от сжигания природного газа и экзотермических реакций в окатышах, которое определяется уравнением (4).

$$Q_D = \frac{L}{V_{II}} \cdot (G_{ПГ} \cdot q_{ПГ} + G_{ОК} \cdot q_{ЭКЗ}), \quad (4)$$

где  $G_{ПГ}$  – расход природного газа;  $G_{ОК}$  – расход окатышей;  $q_{ПГ}$  – удельная теплота сгорания природного газа;  $q_{ЭКЗ}$  – удельная теплота экзотермических реакций в окатышах;

- в зонах рекуперации и охлаждения передача тепла осуществляется от слоя к теплоносителю.

Разработанные модели зон и секций позволяют рассчитать оптимальный режим обжига слоя в установившемся режиме. Однако, существенное изменение какого-либо из возмущающих факторов ( $V_{II}$ ;  $U_{ОК}$ ;  $d$ ;  $C_M$ ) приводит к отклонению параметров



режима обжига от оптимальных. Для работы машины в режиме максимальной энергетической эффективности необходимо оценивать возмущения и использовать эту информацию для корректировки параметров оптимального режима обжига.

4. В результате анализа установлено влияние ряда управляющих воздействий на режим в нескольких зонах одновременно. Поэтому поиск оптимальных параметров режима проводился по группам зон, объединенных общностью управляющих воздействий.

В первую группу зон вошла секция зоны сушки Ia, во вторую группу секции Ib, Ic и зона подогрева. Локальные целевые функции первой и второй групп зон имеет следующий вид:

$$\Theta_{OK.BYX}(\bar{m}) \rightarrow \max_{\bar{m} \in \bar{M}} \quad (5)$$

где  $\bar{m}, \bar{M}$  - вектор управляющих воздействий и область его возможных значений соответственно.

Обеспечение максимальной температуры слоя перед зоной обжига, с учетом ограничений, позволит затратить минимальное количество природного газа на нагрев окатышей до регламентной температуры в зоне обжига. Поиск управляющих воздействий, соответствующих максимуму целевой функции, осуществлялся методом полного перебора. Для этого на возможный диапазон управления накладывалась сетка. Перебор значений управляющих воздействий выполнялся переходом по узлам сетки. Время поиска находится в допустимых пределах, поскольку размерность вектора управляющих воздействий в первой и второй группах зон  $\dim \bar{m} \leq 3$ .

В третью группу зон вошли все секции зоны обжига и зона рекуперации. Целевая функция в данной группе зон:

$$G_{III}(\bar{m}) \rightarrow \min_{\bar{m} \in \bar{M}} \quad (6)$$

Размерность вектора управляющих воздействий в третьей группе  $\dim \bar{m} = 7$ , что делает неэффективным использование метода полного перебора. Поэтому поиск управляющих воздействий выполнялся методом декомпозиции, который позволяет разбить общую задачу на ряд более простых, решаемых на нижнем уровне системы. Взаимодействием подсистем нижнего уровня управляет координатор. Структурная схема двухуровневой системы принятия решений приведена на рисунке 1.

Для управляющих подсистем  $P_{1...7}$  задана задача оптимизации:

$$\sum_{i=1}^7 G_{III_{1...7}}(m_{1...7}) \rightarrow \min_{\bar{m} \in \bar{M}}, \quad (7)$$

где  $m_{1...7}$  - расходы природного газа на соответствующую пару горелочных устройств.

Температура слоя  $\Theta_{OK.BYX_i}$  на выходе из каждой i-й секции зоны обжига должна достигать заданного координатором значения  $\Theta_{OK.BYX_{i3K}}$  с точностью  $\epsilon$ .

$$|\Theta_{OK.BYX_i} - \Theta_{OK.BYX_{i3K}}| \leq \epsilon \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

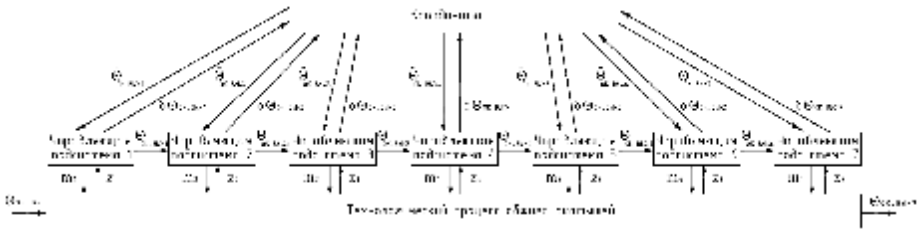


Рис. 1 Двухуровневая система принятия решений

Значения температуры  $\Theta_{OK.VYX_i ZK}$  задаются координатором с учетом характера нагрева слоя окатышей и ограничений технологического регламента. Изменение температуры слоя в зоне обжига аппроксимировалось функцией (9).

$$\Delta\Theta_{OK} = \Theta_{OK.VX} + \left( \Theta_{OK.VYX_7 ZK} - \Theta_{OK.VX} \right) \times \left( 1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (9)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – постоянные времени переходного процесса;  
 $t$  – время нахождения окатышей в зоне обжига.

Подставляя в уравнение (9) вместо  $t$  время пребывания окатышей до выхода из рассматриваемой секции, получим заданные значения температур слоя на выходе каждой секции зоны обжига. При этом в каждой секции зоны обжига одно управляющее воздействие – расход газа на пару горелок, поэтому подсистемы нижнего уровня выполняют поиск оптимального значения расхода методом золотого сечения.

В четвертую и пятую группу зон входят зоны охлаждения I и II. Целевая функция четвертой и пятой групп зон имеет вид:

$$\Theta_{OK.VYX}(\bar{m}) \rightarrow \min_{\bar{m} \in M} \quad (10)$$

При минимальной температуре слоя на выходе из четвертой и пятой групп зон охлаждающему слой теплоносителю передается максимальное количество тепла. Нагретый таким образом теплоноситель поступает в зону обжига, где для разогрева его до температуры обжига окатышей затратится минимальное количество природного газа. Поиск управляющих воздействий, соответствующих максимуму целевой функции, выполнялся методом полного перебора, поскольку  $dim \bar{m} \leq 3$ .

Процедуры оптимизации запускаются при изменении параметров слоя: скорости движения паллет ( $V_{П}$ ); среднего диаметра гранул ( $d_{ср}$ ); влажности слоя ( $u_{вх}$ ) кажущейся теплоемкости слоя ( $\dot{C}_{ок}$ ) более чем на предельно допустимую величину от значений, использовавшихся при предыдущей оптимизации.

**В третьей главе** разработана подсистема стабилизации оптимального режима работы ОМ.

Возмущения приводят к отклонению температуры слоя от расчетного значения что может вызвать ухудшение качества гранул на выходе ОМ, поэтому необходимо стабилизировать температуру слоя на заданном уровне, не допуская выхода за регламентный диапазон.

1. На основе метода Т. Шумана разработаны динамические математические модели охлаждения теплоносителя и нагрева слоя окатышей для секции зоны сушки Ia

Модели позволяют прогнозировать изменение температуры теплоносителя на выходе из слоя и окатышей на выходе из зоны. Неизмеряемая температура гранул прогнозируется в трех точках по высоте слоя. Структурные схемы моделей охлаждения теплоносителя и нагрева слоя окатышей приведены на рисунке 2.

Входами моделей охлаждения теплоносителя и нагрева слоя являются:  $\delta C_M$  – изменение кажущейся теплоемкости окатышей,  $\delta p$  – изменение перепада давления,  $\delta T_{\Gamma}$  – изменение температуры теплоносителя на входе в слой,  $\delta T'_{M,0.25}$  – изменение температуры (в средней точке по высоте) слоя на входе в зону. Выход модели охлаждения теплоносителя – это изменение средней температуры газа на выходе из слоя  $\delta T_{\Gamma,cp}$ , а модели нагрева слоя окатышей – изменение температуры материала в контролируемых точках  $\delta T_{M,h}$  на заданных уровнях  $h$  слоя. Проведенный анализ показал, что в пределах регламентных режимов модели можно линеаризовать без существенного снижения точности моделирования.

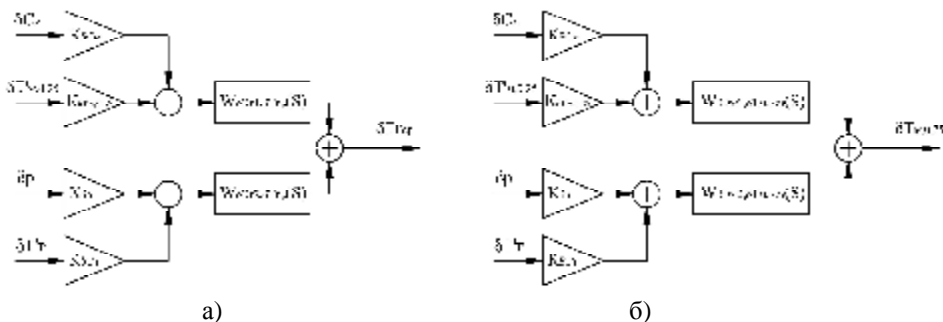


Рис. 2 Структурные схемы динамических ММ охлаждения

теплоносителя (а) и нагрева окатышей в средней точке слоя (б) (для верхней и нижней точек слоя структура моделей аналогична).

В пространстве состояний модель охлаждения теплоносителя имеет стандартный вид:

$$\begin{cases} X_T'(t) = A_T \cdot X_T(t) + B_T \cdot U(t); \\ Y_T(t) = C_T \cdot X_T(t), \end{cases} \quad (11)$$

где  $X_T$  – вектор состояния модели теплоносителя;  $U = (\delta C_M, \delta p, \delta T_{\Gamma}, \delta T'_{M,0.25})^T$  – вектор входов;  $Y_T = \delta T_{\Gamma,cp}$  – измеряемый выход;  $A_T, B_T, C_T$  – структурные матрицы модели.

Структура модели нагрева слоя окатышей отличается от (11) наличием транспортного запаздывания в канале изменения кажущейся теплоемкости  $\delta C_M$  и температуры слоя  $\delta T'_{M,0.25}$  на входе в зону, что отражает третье слагаемое правой части (12)

$$\begin{cases} X_C'(t) = A_C \cdot X_C(t) + B_{0C} \cdot U(t) + B_{1C} \cdot U(t - \tau); \\ Y_C(t) = C_C \cdot X_C(t). \end{cases} \quad (12)$$

где  $Y_C = \delta T_{M,h}$  – неизмеряемый выход, оцениваемый по модели;  $\tau$  – транспортное запаздывание, равное времени пребывания окатышей в зоне.

Структуры моделей зон обжига и рекуперации отличаются от моделей секции зоны сушки Ia. В моделях зоны обжига дополнительно учитывается расход природного газа горелочными устройствами, а в модели зоны рекуперации изменение температур теплоносителя в средней точке слоя. Для остальных зон ОМ структуры моделей изменения температуры слоя и теплоносителя аналогичны приведенным на рисунке 2.

2. На основе модели (11) разработано наблюдающее устройство, которое по результатам измерения параметров теплоносителя в зоне ( $\delta p$ ,  $\delta T'_g$ ,  $\delta T'_{гcp}$ ) и модельному значению температуры слоя на выходе предшествующей зоны ( $\delta T'_{м,0,25}$ ) оценивает неизмеряемое возмущение  $\delta C_m$ . Уравнение наблюдателя в пространстве состояний имеет вид:

$$\begin{cases} X'(t) = A \cdot X(t) + B \cdot U(t) + K \cdot \Delta Y(t) \\ Y(t) = C \cdot X(t) + D \cdot U(t) \end{cases} \quad (13)$$

где: A, B, C, D, K – структурные матрицы наблюдателя.

$X = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t)]^T$  – координаты состояния наблюдателя. При построении наблюдателя предполагается, что  $\delta C_m$  изменяется достаточно медленно. Наблюдатель дает оценку  $\delta C_m$  по результатам измерения  $\delta p$ ,  $\delta T'_g$ ,  $\delta T'_{гcp}$  в зоне и выходной величине  $\delta T'_{м,0,25}$  модели слоя предшествующей зоны. Координаты наблюдателя  $x_1, \dots, x_3$  являются оценками координат состояния модели (11), а координата  $x_4$  – оценкой текущего значения  $\delta C_m$ . Анализ подтвердил наблюдаемость системы. Условием сходимости процесса наблюдения является отрицательности вещественных частей всех собственных чисел  $\lambda_i$  матрицы [A-K·C]. Коэффициенты матрицы K выбраны на основе модального подхода из условия  $\lambda_i = -12 \ \forall i = 1, \dots, 4$ .

Моделирование работы наблюдателя показало быстрый и точный выход оценок на истинные значения, что позволяет своевременно корректировать неизмеряемые температуры слоя окатышей в контрольных точках.

3. Разработана система автоматического регулирования на основе регулятора состояния. Система включает в себя контур регулирования, который предназначен для стабилизации температуры окатышей по заданию в средней точке слоя, и блок коррекции задания по температуре слоя. Структурная схема системы автоматического регулирования приведена на рисунке 4.

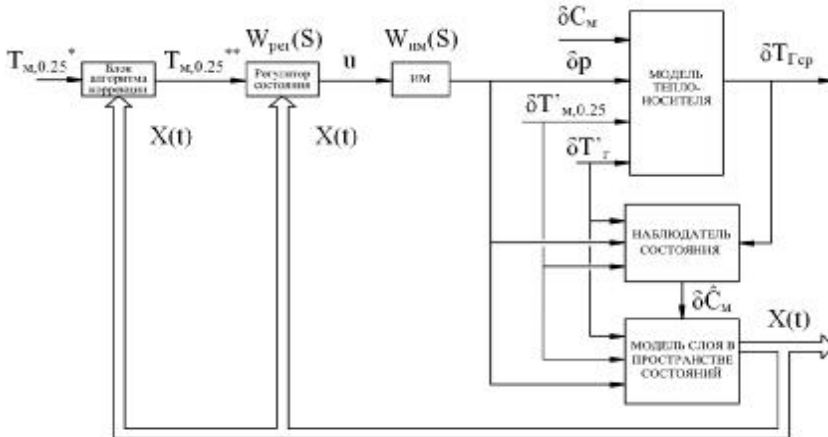


Рис. 4 Система автоматического регулирования температуры слоя по высоте

Изменение температуры слоя окатышей по высоте прогнозируется моделью (12) входами которой являются измеряемые сигналы  $\delta p$  и  $\delta T'_g$ , а также выход модели слоя предшествующей зоны  $\delta T'_{м,0,25}$  и оцениваемое наблюдателем значение  $\delta C_m$ . Полученные по модели координаты состояния, поступают на вход регулятора.

состояния для выработки управляющего воздействия и в блок коррекции задания по температуре слоя.

Уравнение регулятора состояния имеет вид:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) + u_{\text{комп}}(t) + u_{\text{уст}}(t) \quad (14)$$

где  $u_{1...3}$  – управляющие воздействия, возникающие при отклонении координат состояния от желаемых значений;

$u_{\text{комп}}$  – управляющее воздействие, компенсирующее возмущения;

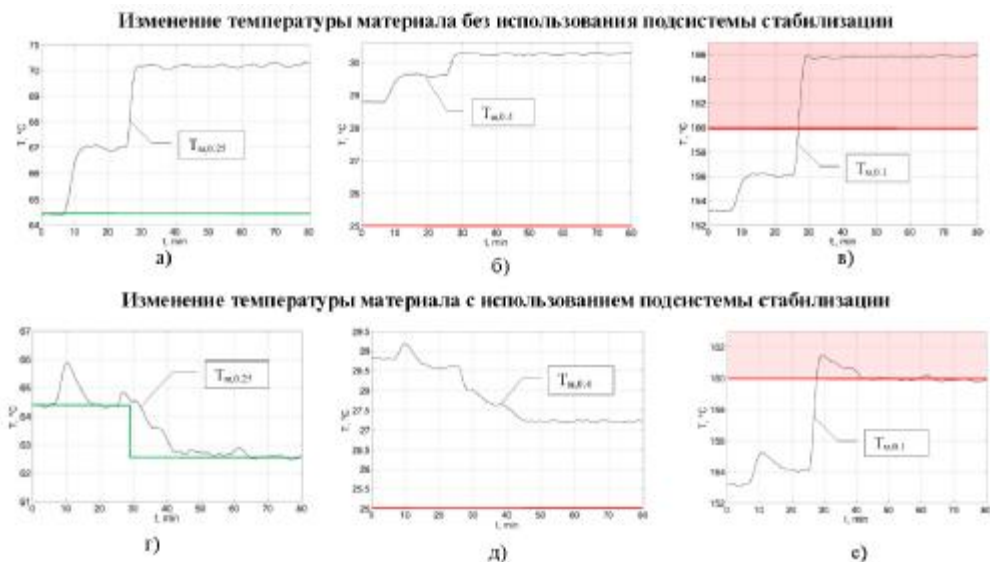
$u_{\text{уст}}$  – значение управляющего сигнала в установившемся режиме работы.

Настройка регулятора осуществлялась методом градиентного спуска. Критерий оптимизации имел вид:

$$J(R) = \int_0^{t_k} (e^2(t) + r_1 \cdot \dot{e}^2(t) + r_2 \cdot \ddot{e}^2(t)) dt \quad (15)$$

где  $r_1$  – весовые коэффициенты;  $\epsilon(t) = T_{\text{м},0.25}^{**} - y(t)$  – величина рассогласования  $R$  – вектор параметров регулятора.

Задание по температуре слоя в средней точке  $T_{\text{м},25}^*$  поступает от системы оптимизации режима. Алгоритм коррекции предназначен для формирования нового задания  $T_{\text{м},25}^{**}$ , если в установившемся режиме работы ОМ температура в одной из крайних точек слоя выходит за рамки регламента. Результаты работы подсистемы стабилизации режима с коррекцией приведены на рисунке 5.



Графики температуры материала:

а, г – в средней точке слоя; б, д – в верхней точке слоя; в, е – в нижней точке слоя.

Рис. 5 Температура материала в контрольных точках на выходе из секции зоны сушки Ia

На графике в рисунка 5 показано, что под действием возмущений температура окатышей в нижней части слоя  $T_{\text{м},0.1}$  выходит за пределы регламента, что может негативно сказываться на гранулах (сколы, расслоения, переувлажнение верхней части

слоя). На графиках  $z$  и  $e$  показано, как подсистема стабилизации путем корректировки задания по температуре в средней части слоя  $T_{m,0.25}$  возвращает температуру нижней части слоя  $T_{m,0.1}$  в пределы регламента, тем самым обеспечивая стабилизацию температуры слоя по высоте.

**В четвертой главе** проработаны вопросы практической реализации системы управления обжигом окатышей в ОМ. Система управления реализуется на трехуровневой архитектуре технических средств автоматизации.

Подсистема статической оптимизации полностью реализована в операторской станции. Часть системы стабилизации режима, которая производит значительное количество вычислительных операций, расположена в операторской станции, а оставшаяся в контроллере. Разработана экранная форма, представляющая в удобной форме оператору информацию о технологическом процессе обжига, а также позволяющая осуществлять настройку системы управления.

На рисунке 7 приведена схема алгоритма программ, реализуемых в SCADA системе операторской станции. В начале работы алгоритма происходит ввод текущих параметров слоя сырых окатышей и теплоносителя по группам зон ОМ. Затем наблюдатель производит оценку постоянной составляющей эквивалентного возмущения. На основе полученных данных система принимает решение о необходимости оптимизации существующего режима обжига, после чего подсистема статической оптимизации начинает свою работу.

Вычисленные оптимальные параметры режима передаются в динамические ММ которые производят оценку текущей температуры слоя. На экранную форму оператора поступают данные о температуре окатышей в трех точках по высоте слоя, влажности окатышей, расходе природного газа. Данные о температуре слоя также поступают на вход блока коррекции и в контур автоматического регулирования.

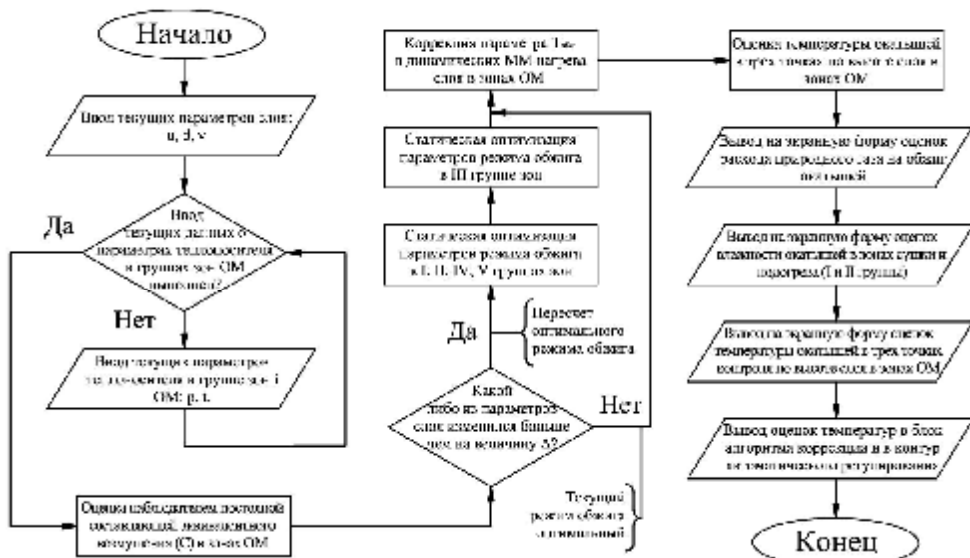


Рис. 7 Алгоритм работы программ, реализуемых в SCADA системе

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе уравнений газодинамики и теплообмена зернистого слоя разработана структура статической математической модели для зон обжиговой машины. Параметры модели адаптированы к реальному процессу по результатам обработки экспериментальных данных, полученных во время термообработки слоя.

2. Разработана подсистема статической оптимизации режима обжига окатышей в ОМ, которая позволяет осуществлять поиск оптимальных температур, давлений теплоносителя и температур слоя окатышей в группах зон ОМ, при которых обеспечивается снижение удельного расхода природного газа.

3. На основе уравнений Т. Шумана разработаны динамические математические модели, оценивающие изменение температуры: теплоносителя на выходе из слоя в зонах и слоя окатышей на выходе из зон обжиговой машины.

4. Разработан наблюдатель, отличающийся возможностью оперативной оценки не только координат состояния объекта управления, но и неизмеряемого значения возмущения (кажущейся теплоемкости слоя). На основе наблюдателя построен регулятор состояния, обеспечивающий стабилизацию оптимальной температур окатышей.

5. Разработана подсистема стабилизации оптимального режима обжига окатышей в конвейерной обжиговой машине, позволяющая удерживать оптимальные температуры обжига слоя при изменении неизмеряемого значения кажущейся теплоемкости слоя или изменении параметров газо-воздушной среды в зонах ОМ.

6. Предложена структура программно-технического комплекса, реализующего разработанные модели, алгоритмы, методы контроля, управления и оптимизации в рамках действующей АСУТП ФОК ЛГОКа.

Адекватность разработанных статических математических моделей оценивалась по методу Фишера. Модельные оценки являются статистически значимыми, а общая погрешность оценок, включающая погрешность приборов измерения и модели, при достижении слоев регламентной температуры обжига не превышает 8 %. Результат работы системы управления показал снижение расхода природного газа от 2 до 3,5 %.

Дальнейшие исследования по повышению эффективности процесса обжига окатышей на основе модернизации АСУ ТП должны вестись в направлении повышения производительности ОМ при соблюдении регламентных требований по качеству окатышей.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Пирматов, Д.С.** Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима [Текст] / В.А. Кривоносов, Д.С. Пирматов // Вестник Воронежского государственного технического университета 2010. Т.6. - №5. С. 128-132 (доля участия автора – 30%).

2. **Пирматов, Д.С.** Контроль температуры окатышей по зонам обжиговой машины [Текст] / В.А. Кривоносов, Д.С. Пирматов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. – №8. – С. 189-194 (доля участия автора – 40%).

3. **Пирматов, Д.С.** Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины [Электронный ресурс] / В.А. Кривонос, Д.С. Пирматов // «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. Режим доступа <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1754> (доступ свободный) – Загл. экрана. - Яз. Рус (доля участия автора – 50%).

#### Статьи и материалы конференций

4. **Пирматов, Д.С.** Повышение эффективности управления процессом термообработки окатышей на конвейерной обжиговой машине ОК-306 [Текст] // Сборник трудов региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов – Старый Оскол., 2009. – С. 38-42.

5. **Пирматов, Д.С.** Моделирование процесса тепловой обработки окатышей для оптимизации работы обжиговой машины [Текст] // Сборник трудов международной научно – практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов «образование, наука, производство и управление». – Старый Оскол., 2009. – С. 94-97.

6. **Пирматов, Д.С.** Моделирование влагосодержания окатышей в зоне сушки обжиговой машины [Текст] // Материалы III научно – технической конференции ОАС «ОЭМК» - Старый Оскол., 2010. – С. 42-43.

7. **Пирматов, Д.С.** Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине [Текст] // Сборник трудов всероссийской конференции: Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ. 2010. – Воронеж., 2010. – С. 88-89.

8. **Пирматов, Д.С.** Оптимизация режима обжига окатышей в обжиговой машине [Текст] // Сборник трудов седьмой международной научно-технической конференции Современная металлургия начала нового тысячелетия. – Липецк., 2010. – С. 121-125.

9. **Пирматов, Д.С.** Поиск оптимальных параметров режима обжига окатышей в АСУ ТП обжиговой машины [Текст] // Сборник трудов международной конференции АПИР-15. – Тула., 2010. – С.191-194.

10. **Пирматов, Д.С.** Повышение эффективности управления обжигом окатышей в конвейерной обжиговой машине [Текст] / В.А. Кривонос, Д.С. Пирматов / Материалы научно-технической конференции информационные технологии в металлургии и машиностроении. Днепропетровск, 26-28 марта 2013 г. Днепропетровск: НацМетАУ, 2013. - С.50-52 (доля участия автора – 50%).

Подписано к печати «22» октября 2013 г.

Тираж 100 экз. Объем 1 п. л.

Заказ № 166

---

Полиграфический отдел ФГБОУ ВПО «Госунiversитет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65