

На правах рукописи

Салихов Марат Зуфарович

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ И
ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМАМИ ОБЖИГА
ИЗМЕЛЬЧЕННОГО НИКЕЛЕВОГО ФАЙНТШТЕЙНА В
ПЕЧИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ С ФОРКАМЕРОЙ

Специальность 05.13.06 - Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами
(в металлургии).

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кан-
дидата технических наук

Москва, 2009 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы:

Процессы обжига никелевого файнштейна в печах кипящего слоя (КС) и последующего сульфатхлорирующего обжига полученного огарка относятся к важнейшим переделам производства никеля из окисленных руд.

Установлено, что увеличение температуры обжига файнштейна выше 1050 °С приводит к укрупнению огарка оплавлением, а снижение ее ниже 800 °С приводит к переизмельчению. Укрупнение и переизмельчение огарка обуславливают нарушение известных нормальных условий псевдооживления по Годесу, что является одной из главных причин появления риска возникновения тяжелых технологических нарушений, требующих проведения ресурсоемких операций на восстановление работоспособности печи КС и вспомогательного оборудования. К таким результатам часто приводит появление значительных перепадов давления кислородно-воздушной смеси под подинами форкамеры и реакционной зоны печи КС. Например, чрезмерное снижение количества шихты, подаваемой в форкамеру печи, приводит к снижению аэросопротивления форкамеры. При этом скорость восходящего потока в ней возрастает до критической, когда образуется фонтанирующий восходящий поток воздуха из форкамеры. Данный поток, как насос, увлекает с собой в газоотводящий тракт все мелкие частицы из форкамеры, а также витающие над реакционной зоной печи КС частицы с крупностью $0,14 \div 0,07$ мм, доля которых составляет от 4 % до 30 % от общей массы шихты в реакторе КС.

Из изложенного видно, что при обжиге в КС никелевого файнштейна необходимо с минимальной динамической и статической ошибками управлять температурным режимом и аэродинамикой псевдооживления из условия минимизации пылевыноса, а также исключения возможных потерь работоспособности печи КС и потери металлов.

КС как объект управления относится к классу непрерывных многомерных и многокритериальных динамических объектов. Неконтролируемые возмущения, отсутствие возможности оперативного получения текущей информации о качестве получаемого огарка, и значительное (2–3 часа) запаздывание в получении информации о составах компонентов исходной шихты существенно усложняют задачу качественного управления рассматриваемым процессом обжига.

Известные способы и автоматические системы управления температурным и аэродинамическими режимами обжига измельченного никелевого файнштейна, не учитывают нестационарностей состава компонентов шихты и транспортного запаздывания подачи шихты в форкамеру печи КС. Устранение этих недостатков известных САУ-КС позволит получить:

- сокращение потерь цветных металлов и улучшение экологической безопасности переработки окисленных руд за счет сокращения выбросов пылей и сернистых газов;
- повышение надежности непрерывной работы печи КС за счет повышения качества управления аэродинамическим и температурным режимами процесса обжига никелевого файнштейна в КС с форкамерой;
- повышение объемов качественного огарка после обжига измельченного файнштейна.

Этим объясняется актуальность решения задачи создания высококачественной системы автоматического управления температурным и аэродинамическим режимами обжига в КС измельченного никелевого файнштейна из окисленных руд.

Цель работы и научно-технические вопросы исследования: стабилизация качества получаемого огарка на регламентированном уровне, управление аэродинамикой форкамеры и реакционной камеры печи КС из условия минимизации выбросов пыли и сернистого газа, а также повышения надежности непрерывного функционирования процесса обжига в КС за счет совершенной компьютерной системы автоматического управления.

Достижение этой цели требует рассмотрения следующих научно-технических вопросов:

- исследование закономерности изменения температуры в форкамере печи КС от содержания серы в загружаемом измельченном файнштейне (далее шихта) полученном из окисленных никелевых руд;
- разработка математической модели процесса обжига и никелевого файнштейна; модельные и экспериментальные исследования динамических и статических характеристик каналов управления аэродинамическим и температурным режимами управления процессом обжига никелевого файнштейна в печи КС с форкамерой;
- разработка алгоритмов автоматической стабилизации аэродинамических и температурных режимов обжига файнштейна;
- разработка структуры и алгоритма функционирования самонастраивающегося контроллера-регулятора для компенсации нестационарностей характеристик тракта загрузки шихты в печь КС;
- разработка функциональной схемы интегрированной системы автоматического управления температурным и аэродинамическим режимами обжига измельченного никелевого файнштейна из окисленных руд в печи КС с учетом частотных свойств каналов управления и удовлетворения выбранных целевых функций управления при заданных технологических ограничениях;
- испытания разработанных алгоритмов функционирования подсистем САУ в реальных условиях обжига файнштейна в печи КС-1 ОАО «Южуралникель».

Исследования проводились в соответствии с региональной программой «Экологическая безопасность населения Оренбургской Губернии», утвержденной Минэкологии и Минфином России от 1997 г., гранта губернатора Оренбургской области «Экологически безопасная технология переработки окисленных никелевых руд Буруктальского месторождения и тематическими планами НИР МИСиС и ОДО «Научно учебного производственного комплекса «КАГУС» на 2002-2006 г.г. (хоздог. 417/02-1 и 480/04-М).

Методы исследования. Теоретические результаты работы обоснованы математически с использованием теории вероятностей, методов математического описания химико-металлургических процессов, методов современной теории автоматического управления, параметрическая идентификация математических моделей процесса обжига проводилась с использованием пассивных и активных экспериментов на реальном объекте. Теоретические положения также подтверждены расчетами по компьютерной модели и испытаниями подсистем регулирования и алгоритмов на реальной печи КС с форкамерой.

Научная новизна:

- на основе анализа состояния техники и необходимости выполнения цели решения актуальной задачи, сформулированы целевые критерии управления и технологические ограничения;
- для информационной поддержки базовых законов управления процессом обжига установлена закономерность изменения температуры в форкамере печи КС в зависимости от содержания серы в загружаемой в печь шихте – никелевом файнштейне и оборотной пыли;
- разработаны способы автоматического управления температурным и аэродинамическим режимами процесса обжига измельченного никелевого файнштейна в печи КС с форкамерой (патент № 2265779. Бюлл. 34 от 10.12.2005 г. и патент № 2293936. Бюлл. 5 от 20.02.2007 г.);
- разработана структура и алгоритм функционирования самодиагностирующегося и самонастраивающегося контроллера-регулятора для компенсации диагностируемой нестационарности параметров характеристики канала управления «шихта – температура огарка» (патент на изобретение по заявке № 2001115574 от 30.11.2006 г.);
- разработаны блок-схема интегрированной САУКС и алгоритмы функционирования системы автоматического управления аэродинамическим и температурным режимами процесса обжига измельченных никелевых файнштейнов в печи КС с форкамерой, удовлетворяющая 2-м предложенным в работе целевым критериям управления при заданных технологических ограничениях.

Практическая значимость работы заключается в том, что реализация результатов, полученных в диссертационной работе, приведет к достижению значительного улучшения качества огарка, повышению надежности непрерывного функционирования процесса обжига и улучшению экологической ситуации за счет снижения пыли и газо-выбросов.

Реализация результатов работы. По результатам выполненной диссертационной работы составлено и принято ОАО «Южуралникель» техническое задание (ТЗ) на создание «Компьютерной АСУ ТП обжигового цеха (1-ая очередь КАСУ-ТП на участке измельчения фэйнштейна – обжиг в печах кипящего слоя). Москва – Орск. 2005 г., с.-100.

Испытания отдельных подсистем и алгоритмов в промышленных условиях подтвердили снижение динамической ошибки управления температурным режимом в 3-4 раза и снижение пылевых выбросов на 20-30%.

Результаты работы используются также в учебном процессе при подготовке специалистов в ВУЗе по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств в металлургии».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе, в изданиях по перечню ВАК РФ – 4 работы.

Структура работы. Диссертационная работа изложена на 125 страницах, состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе работы проведен анализ современного состояния вопроса автоматического управления процессом обжига измельченного никелевого фэйнштейна в печах кипящего слоя. В результате проведенного анализа сформулированы вопросы исследования, направленные на решение выявленной актуальной научно-технической задачи управления пирометаллургическими процессами в печах КС с форкамерой.

При рассмотрении условий образования кипящего слоя различают минимальную критическую скорость $V_{кр}^{min}$, при которой слой сыпучего материала начинает переходить из неподвижного в псевдооживленное состояние и максимальную критическую скорость $V_{кр}^{max}$, при которой частицы псевдооживленного состояния начинают выноситься из реакционной зоны печи кипящего слоя. Максимальная критическая скорость в десятки раз больше минимальной критической скорости. Для наглядности изложенного на рис.1 приведен общий вид графика псевдооживления, отражающий взаимосвязи скоростей восходящих потоков, давления или расхода кислородно-воздушной смеси (КВС).

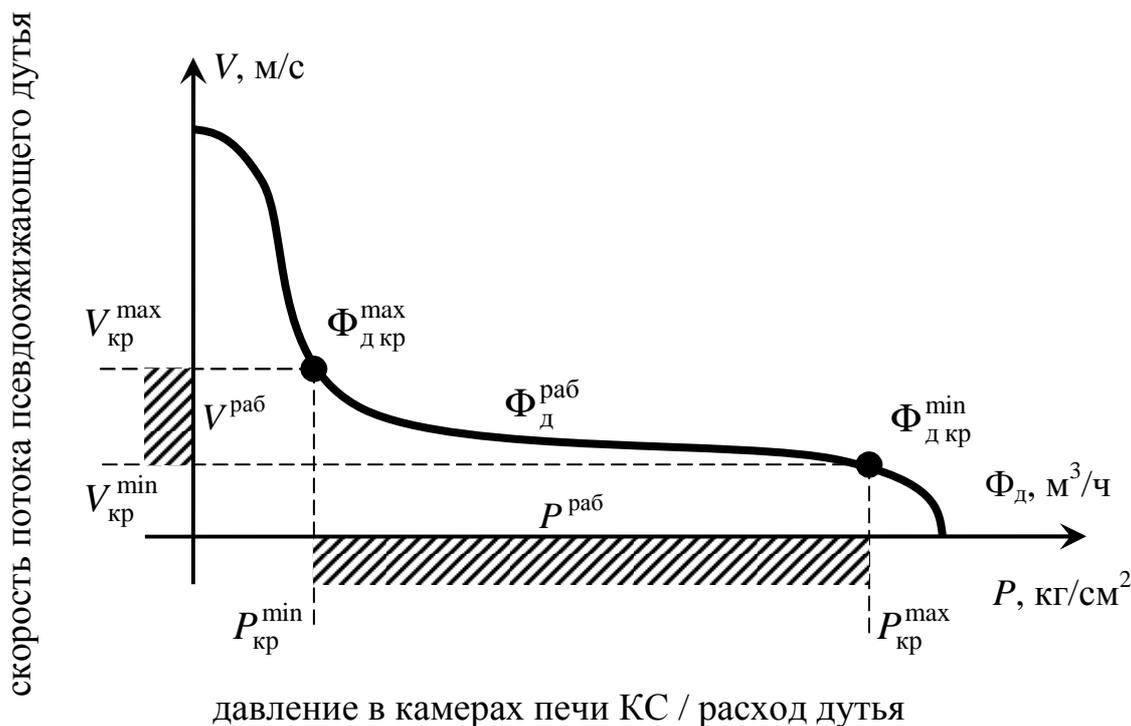


Рис. 1. Общий вид графика псевдоожижения частиц шихты от давления или расхода дутья

Печь для обжига в кипящем слое (рис. 2) представляет собой цилиндрическую шахту, выложенную в плотном железном кожухе и футерованную огнеупорным кирпичом.

Главной частью печи КС является подина - 2 с отверстиями или соплами, представляющая собой устройство для равномерного распределения воздуха, подаваемого снизу в кипящий слой. Подина имеет такую конструкцию, чтобы при минимальном сопротивлении обеспечивалось равномерное распределение воздуха по горизонтальному сечению слоя, а зернистый материал не проваливался через отверстие для прохода воздуха и эти отверстия не засорялись. Площадь подины S_1 реакционной камеры печи КС относится к площади ее форкамеры S_ϕ как $S_1/S_\phi \sim 10 \div 35$.

Восходящий поток дутьевого воздуха, проходящий через загруженный слой материала, поддерживает материал в состоянии псевдоожижения и вступает с ним во взаимодействие. Часть более мелких частиц (обычно более 20 % от общего их объема в шихте) выносятся потоком газа из кипящего слоя и продолжает взаимодействовать с ним во взвешенном состоянии над слоем в зоне расширения корпуса печи, а часть уносится в газоход.

Установлено, что наиболее рационально осуществить процесс при температуре, близкой к температуре подплавления никелевого фаянтштейна (980 – 1085) °С.

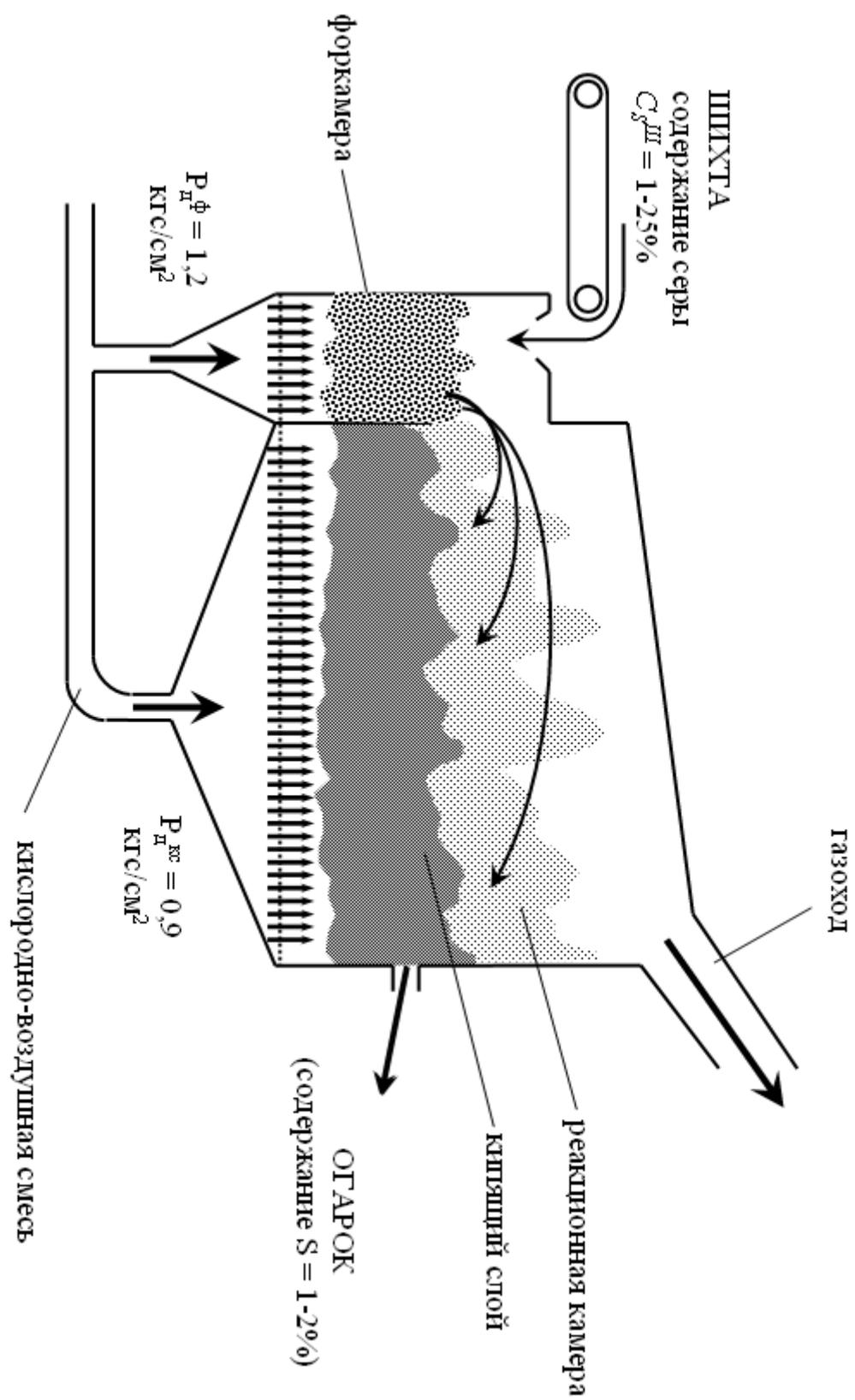


Рис. 2. Конструкция печи КС

При высоких температурах процесс теряет устойчивость – начинается бурное тепло-выделение, частицы расплавляются и происходит спекание материала, что может привести к преждевременной остановке печи.

Таким образом, температура кипящего слоя является наиболее важным параметром, который определяет количественные и качественные показатели процесса с одной стороны и характеризует устойчивость и надежность кипящего слоя с другой.

Изменения количества поступающей шихты в форкамеру обуславливает уменьшение или возрастание скорости восходящего потока дутья в форкамере до критически максимального значения. При этом скорость может возрасти более $V_{кр}^{max}$, т.е. до выноса частиц, в первую очередь, витающих над слоем кипящего слоя. При снижении скорости восходящего потока ниже минимально допустимого, форкамера как бы “запечатывается” шихтовыми материалами в ней, приводя печь практически в нерабочее состояние.

Мастер смены на основе накопленного им опыта и навыков, собственного представления о технологическом процессе задает на вход САУ-КС шихту. Это обеспечивает поддержание заданного технологического режима путем изменения потока загружаемой шихты и изменением скорости ленты дозатора, например, типа «Агроэскорт», а также регулирует общий расход воздуха на дутье.

Вышеописанный способ управления обеспечивает поддержание температуры огарка только в установившемся режиме – без учета нестационарностей состава шихты и транспортно запаздывания подачи шихты в форкамеру и является довольно грубым и несовершенным, и приводит к значительным отклонениям качественных показателей технологического процесса. Доля качественного огарка при этом не превышает 80 %.

Задачу управления температурным режимом усложняют возможные в промышленных условиях глубокие возмущения по химсоставу шихты, в частности – колебания содержания серы в шихте.

Кроме того, при компенсации значительных возмущений по химсоставу шихты возникает необходимость изменять температуру кипящего слоя в достаточно широком диапазоне (100 – 285 °С). При этом весьма существенно быстрое действие управления, обеспечивающего перевод процесса обжига в новый температурный режим, а также предотвращение при этом нарушения аэродинамических режимов функционирования форкамеры и реакционной камеры, которые приводят к увеличению как экологически вредных выбросов в атмосферу, так и нарушению надежной работы печи КС.

Отмеченные недостатки известных способов и систем автоматического управления подтверждают актуальность темы диссертации.

Целью настоящей работы является стабилизация качества получаемого огарка на регламентированном уровне, управление аэродинамикой форкамеры и реакционной камеры печи КС из условия минимизации выбросов пыли и сернистого газа, а также повышения надежности непрерывного функционирования процесса обжига в КС за счет совершенной компьютерной системы автоматики.

Сказанное позволяет сформулировать задачу управления процессом обжига измельченного никелевого файнштейна в кипящем слое как 2-х критериальную. Из обобщения результатов приведенного нами анализа состояния техники и графика на рис. 1 можем записать критерии оптимальности управления:

$$F_1 = \int_{t_{\text{КС}}(\tau)} \left(C_S^{\text{ог}}(\tau) - C_S^{\text{ог зад}} \right)^2 d\tau \rightarrow \min_{t_{\text{КС}}(\tau)},$$

$$F_2 = \int \left(\begin{array}{l} \left[\Phi_{\text{ш}}(\tau) + \Phi_{\text{д}}^{\phi}(\tau) + \Phi_{\text{д}}^{\text{КС}}(\tau) \right] - \\ - \left[\Phi_{\text{ог}}(\tau + \Delta\tau) + \Phi_{\text{газ}}(\tau + \Delta\tau) \right] \end{array} \right) d\tau \rightarrow \min_{\Phi_{\text{д}}^{\phi}(\tau), \Phi_{\text{д}}^{\text{КС}}(\tau)}, \quad (1)$$

при следующих ограничениях:

$$\Phi_{\text{ш}}^{\min} \leq \Phi_{\text{ш}}(\tau) \leq \Phi_{\text{ш}}^{\max}$$

$$(\Phi_{\text{д}}^{\phi})^{\min} \leq \Phi_{\text{д}}^{\phi}(\tau) \leq (\Phi_{\text{д}}^{\phi})^{\max}$$

$$(\Phi_{\text{д}}^{\text{КС}})^{\min} \leq \Phi_{\text{д}}^{\text{КС}}(\tau) \leq (\Phi_{\text{д}}^{\text{КС}})^{\max}$$

$$t_{\text{КС}}^{\min} \leq t_{\text{КС}}(\tau) \leq t_{\text{КС}}^{\max}$$

где τ - время; $C_S^{\text{ог}}(\tau)$ – текущее значение содержания серы в огарке; $C_S^{\text{ог зад}}(\tau)$ – заданное значение остаточного содержания серы в огарке; $\Phi_{\text{ш}}$ – расход шихты; $\Phi_{\text{ш}}^{\min}$, $\Phi_{\text{ш}}^{\max}$ – минимально и максимально допустимые значения расхода шихты; $\Phi_{\text{д}}^{\phi}$ – расход дутьевого воздуха в форкамеру; $\Phi_{\text{д}}^{\text{КС}}$ – расход дутьевого воздуха в печь; $\Phi_{\text{д}}^{\min}$, $\Phi_{\text{д}}^{\max}$ – минимально и максимально допустимые значения расхода дутьевого воздуха; $t_{\text{КС}}$ – температура кипящего слоя; $t_{\text{КС}}^{\min}$, $t_{\text{КС}}^{\max}$ – минимально и максимально допустимые значения температуры кипящего слоя.

Во второй главе установлена закономерность изменения температуры в форкамере печи КС от содержания серы в измельченном никелевом файнштейне, построена математическая модель косвенного непрерывного контроля содержания серы в шихте и предложен алгоритм подстройки параметров указанной модели, через обоснованное автором интервалы времени.

В настоящее время влияние колебаний серы в шихте на температуру обжига компенсируется со значительными запаздываниями, т.е. после появления отклонения выходных по-

казателей процесса от регламентных. Это сопровождается выгрузкой из печи значительного (более 20 %) количества некондиционного огарка за смену. Это объясняется тем, что анализы шихты в большинстве заводов выполняются вручную с частотой 3 – 4 часа или 1-2 раза за смену.

Поэтому установление закономерности изменения температуры в форкамере печи в функции содержания серы поступающей в нее с исходной никельсодержащей шихтой, позволяющей формировать своевременную **информацию о содержании серы в шихте и определение частоты использования этой информации в управлении процессом** являются одними из наиболее важных вопросов при создании высококачественной системы управления рассматриваемым процессом обжига.

По результатам экспериментальных исследований динамических характеристик процесса обжига никелевого фаянштейна на промышленных обжиговых печах ОАО «ЮУНК» установлено существенное различие динамических свойств каналов **«расход шихты – температура в форкамере»** ($\langle \Phi_{\text{ш}} - t_{\text{ф}} \rangle$) и **«расход шихты – температура в рабочей камере»** ($\langle \Phi_{\text{ш}} - t \rangle$). Установлено, что переходный процесс по каналу $\langle \Phi_{\text{ш}} - t_{\text{ф}} \rangle$: ($\tau_{\text{об}}^{\Phi} = 7,2$ мин; $T_{\text{об}}^{\Phi} = 15$ мин.), а по каналу ($\langle \Phi_{\text{ш}} - t \rangle$) определяется как $\tau_{\text{об}}^{\text{КС}} = 4,3$ мин и $T_{\text{об}}^{\text{КС}} = 95$ мин., где $\tau_{\text{об}}^{\Phi}$ и $T_{\text{об}}^{\Phi}$ – соответственно, время чистого запаздывания и инерционность форкамеры; $\tau_{\text{об}}^{\text{КС}}$ и $T_{\text{об}}^{\text{КС}}$ – соответственно, время чистого запаздывания начала изменения температуры материала и инерционность изменения температуры в реакционной камере КС.

Экспериментально полученные графики динамики изменения температуры материала в форкамере и реакционной камере печи КС, подтверждают эффективность автоматического контроля содержания серы в шихте именно через температуру в форкамере печи КС, т.к. возмущение по изменению содержания серы в исходной шихте может быть компенсировано в этом случае в $5 \div 6$ раз быстрее.

Для реализации этого явления (возможности), в работе построена статистическая модель, отражающая обратную зависимость содержания серы в шихте никелевого фаянштейна от температуры в форкамере, расходов шихты и дутьевого воздуха в форкамеру печи КС-1 для обжига никелевого фаянштейна, а также алгоритм формирования для коррекции управляющего воздействия для компенсации неустойчивости содержания серы в загружаемой в печь шихты.

В результате использования предложенного алгоритма был получен регрессионный полином следующего вида:

$$\begin{aligned} \hat{C}_S^{\text{ш}} = & -37,773 + 0,249 \cdot t_{\text{ф}} - 0,011 \cdot \Phi_{\text{д}}^{\Phi} - 0,016 \cdot \Phi_{\text{ш}} \\ & - 0,267 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\text{ф}}^2 + 2,571 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\text{ф}} \cdot \Phi_{\text{д}}^{\Phi} + 2,514 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\text{ф}} \cdot \Phi_{\text{ш}} \end{aligned} \quad (2)$$

где $\hat{C}_s^{ш}$ – оценка содержания серы в шихте, %; $\Phi_{ш}$ – расход шихты, кг/час; Φ_{ϕ}^{ϕ} – расход дутьевого воздуха в форкамеру, м³/час; t_{ϕ} – температура в форкамере, °С. Характеристики полученного полинома: отношение Фишера $F = 47,51$; коэффициент множественной корреляции $R = 0,987$, уровни критерия Стьюдента для членов полинома равны ($s(t_{\phi}) = 24,23$; $s(\Phi_{\phi}^{\phi}) = -12,57$; $s(\Phi_{ш}) = 12,00$; $s(t_{\phi}^2) = -32,13$; $s(t_{\phi} \cdot \Phi_{\phi}^{\phi}) = 14,87$; $s(t_{\phi} \cdot \Phi_{ш}) = 9,79$) при пороговом значении в 1,96.

Полученная регрессионная модель (2) описывает закономерность изменения оценки содержания серы в шихте в зависимости от температуры в форкамере, расходов шихты и дутьевого воздуха в форкамеру. Сглаженные графики зависимости представлены на рис. 3.

Представленные в подрисуночных обозначениях технологические параметры для объекта КС-1 (из-за хорошего совпадения экспериментальных и расчетных графиков на рис. 3 (а и б) – последние не приведены на рис. 3.

Таким образом, полученная зависимость (2) с частотой замеров не менее $w_{\phi}^{\phi} = 1/(\tau_{\phi}^{\phi} + T_{\phi}^{\phi})$ и в пределах класса точности термопары ($\pm 1,5$ %), позволяет автоматически непрерывно контролировать содержание серы в исходной шихте.

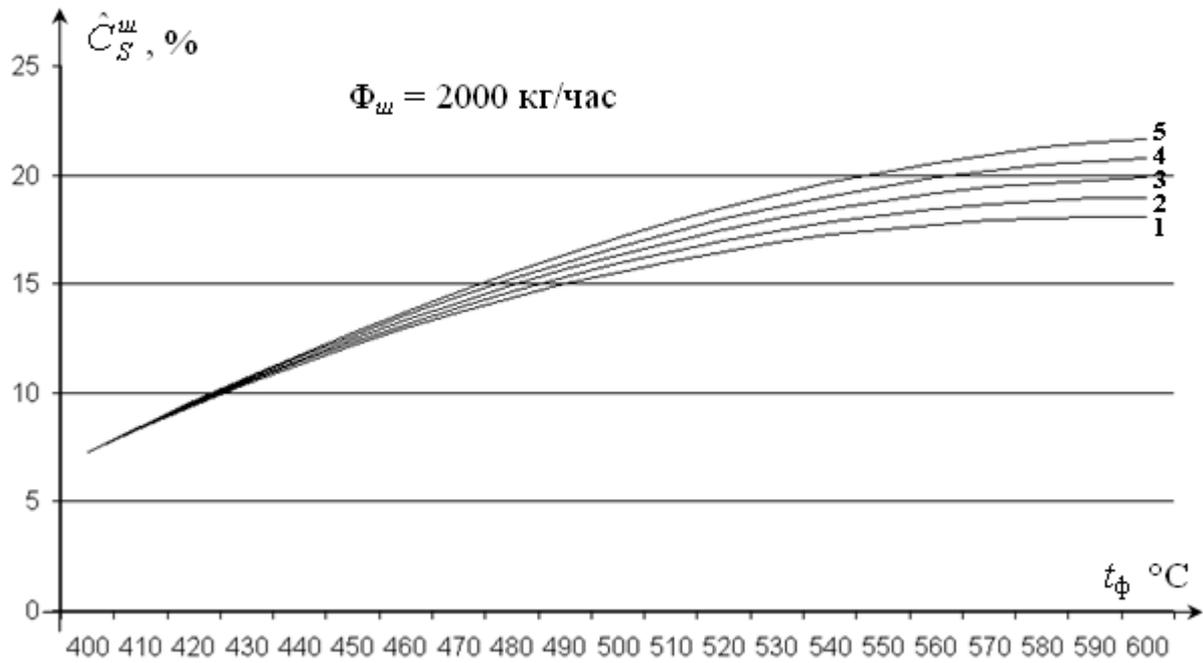
В третьей главе приведена структура математической модели рассматриваемого процесса; проведена идентификация математической модели и **определены неизвестные параметры динамических характеристик печи по различным каналам управления**, полученные экспериментальными исследованиями на промышленных печах КС, а также приведены результаты исследования статических характеристик процесса на его математической модели при использовании различных каналов управления.

В соответствии с решаемой актуальной задачей, одной из важнейшей выходной координатой модели является температура кипящего слоя, поэтому структура математической модели должна включать уравнения материальных балансов по основным реагентам и теплового баланса процесса.

Математическая модель обжига в КС измельченного никелевого фаянштейна в работе описана системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 V_{\Gamma} \frac{dC_{O_2}}{d\tau} &= C_{\text{д}}^{O_2} \Phi_{\text{д}} - KC_{O_2} C_s - k_{\text{в}} V_{\Gamma} C_{O_2} \\
 \frac{G_{\Gamma} dC_s}{d\tau} &= C_s^{ш} \Phi_{ш} - \frac{a_1}{a_2} KC_{O_2} C_s - C_s^{\text{ор}} \Phi_{\text{ор}} - C_s^{\text{п}} \Phi_{\text{п}}, \\
 \frac{G_{\Gamma} C_p dt}{d\tau} &= qKC_{O_2} C_s - C_{\rho}^{\text{ор}} \Phi_{\text{ор}} t - C_{\rho}^{\text{п}} \Phi_{\text{п}} t - C_{\rho}^{\Gamma} \Phi_{\Gamma} t - q_{\text{исп}} W \Phi_{ш} - C_{\rho}^{\text{вп}} W \Phi_{ш} t - k_n t
 \end{aligned} \tag{3}$$

а



б

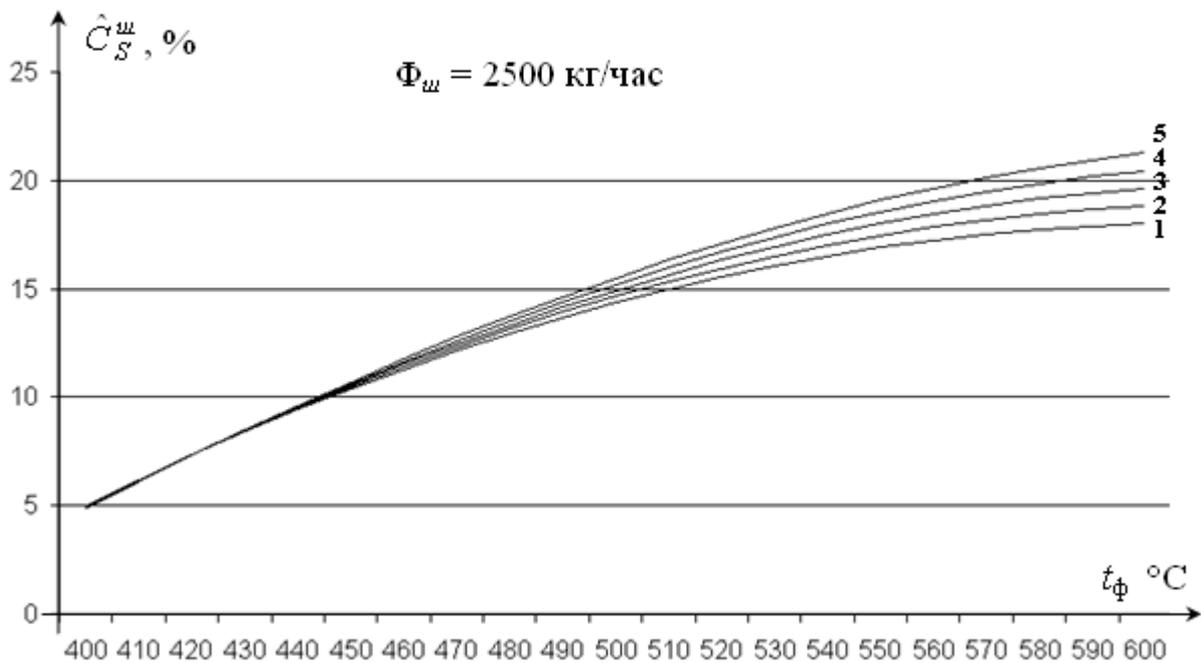


Рис. 3. Сглаженные графики изменения оценки содержания серы в шихте в зависимости от температуры в форкамере, при заданных параметрах расхода шихты и дутьевого воздуха в форкамеру:
а) $\Phi_{III} = 2000 \text{ кг/час}$; б) $\Phi_{III} = 2500 \text{ кг/час}$;
и 1) $\Phi_0^\phi = 750 \text{ м}^3/\text{час}$, 2) $\Phi_0^\phi = 940 \text{ м}^3/\text{час}$, 3) $\Phi_0^\phi = 1125 \text{ м}^3/\text{час}$,
4) $\Phi_0^\phi = 1310 \text{ м}^3/\text{час}$, 5) $\Phi_0^\phi = 1500 \text{ м}^3/\text{час}$

С целью исследования динамических характеристик печи КС были проведены эксперименты, в ходе которых, не меняя Φ_d и C_s^{III} , в канале «расход шихты – температура огарка» расход шихты снижали с 2500 кг/час до 2000 кг/час. При этом автоматическими приборами регистрировалась температура кипящего слоя t в различных зонах печи и изменении знака единичного скачка возмущающего воздействия.

Аналогичный эксперимент был проведен по каналу «расход дутья – температура материала в КС (огарка)» « $\Phi_{III} - t$ », где не меняя Φ_{III} и C_s^{III} , расход дутьевого воздуха повышали с 3000 м³/час до 5000 м³/час, затем, с достижением установившегося состояния, снижали до 3000 м³/час. При этом непрерывно регистрировали термопарой температуру огарка в кипящем слое. Полученные в результате экспериментов кривые разгона для рассматриваемых каналов управления, с учетом кривых представлены на рис. 4 (а и б).

В работе предлагается печь с форкамерой рассматривать условно как последовательное соединение 2-х апериодических звеньев с 2-мя звеньями чистого запаздывания, т.е. как

$$W^{III}(p) = W^{\Phi}(p)W^{КС}(p) = \frac{K_{III}^{\Phi}}{T_{III}^{\Phi}p + 1} e^{-p\tau_{об}^{\Phi}} \frac{K_{III}^{КС}}{T_{III}^{КС}p + 1} e^{-p\tau_{об}^{КС}} \quad (4)$$

Тогда имеем:

$$W^{III}(p) = \frac{K_{об}^{\Phi} \cdot K_{об}^{КС}}{(T_{III}^{\Phi}p + 1)(T_{III}^{КС}p + 1)} e^{-p(\tau_{об}^{\Phi} + \tau_{об}^{КС})} \quad (5)$$

И с учетом отсутствия возможностей обмена энергиями между форкамерой и реакционной зоной печи КС можем писать:

$$W^{III}(p) = \frac{K_{об}^{III}}{T_{III}^{III}p + 1} e^{-p(\tau^{III})} \quad (6)$$

где $\tau^{III} = \tau_{об}^{\Phi} + \tau_{об}^{КС}$, и при этом принять во внимание: что $T_{III}^{\Phi} \ll T_{III}^{КС}$ и $\tau_{об}^{\Phi} \gg \tau_{об}^{КС}$;

$$K_{об}^{III} = K_{III}^{\Phi} K_{III}^{КС}; \quad T_{III}^{III} = T_{III}^{\Phi} + T_{III}^{КС}$$

Числовые значения параметров переходных процессов сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Числовые значения параметров переходных процессов

Канал управления	Время запаздывания $\tau_{об}^{III}, \tau_{об}^{II}$, мин.	Постоянная времени $T_{об}^{III}, T_{об}^{II}$, мин.	Коэффициенты усиления $K_{об}^{III}, K_{об}^{II}$	Соотношения $\tau_{об}^{III}/T_{об}^{III}$ и $\tau_{об}^{II}/T_{об}^{II}$
« $\Phi_{III} - t$ »	11,5	92	0,207	0,072
« $\Phi_d - t$ »	4,3	17	0,524	0,253

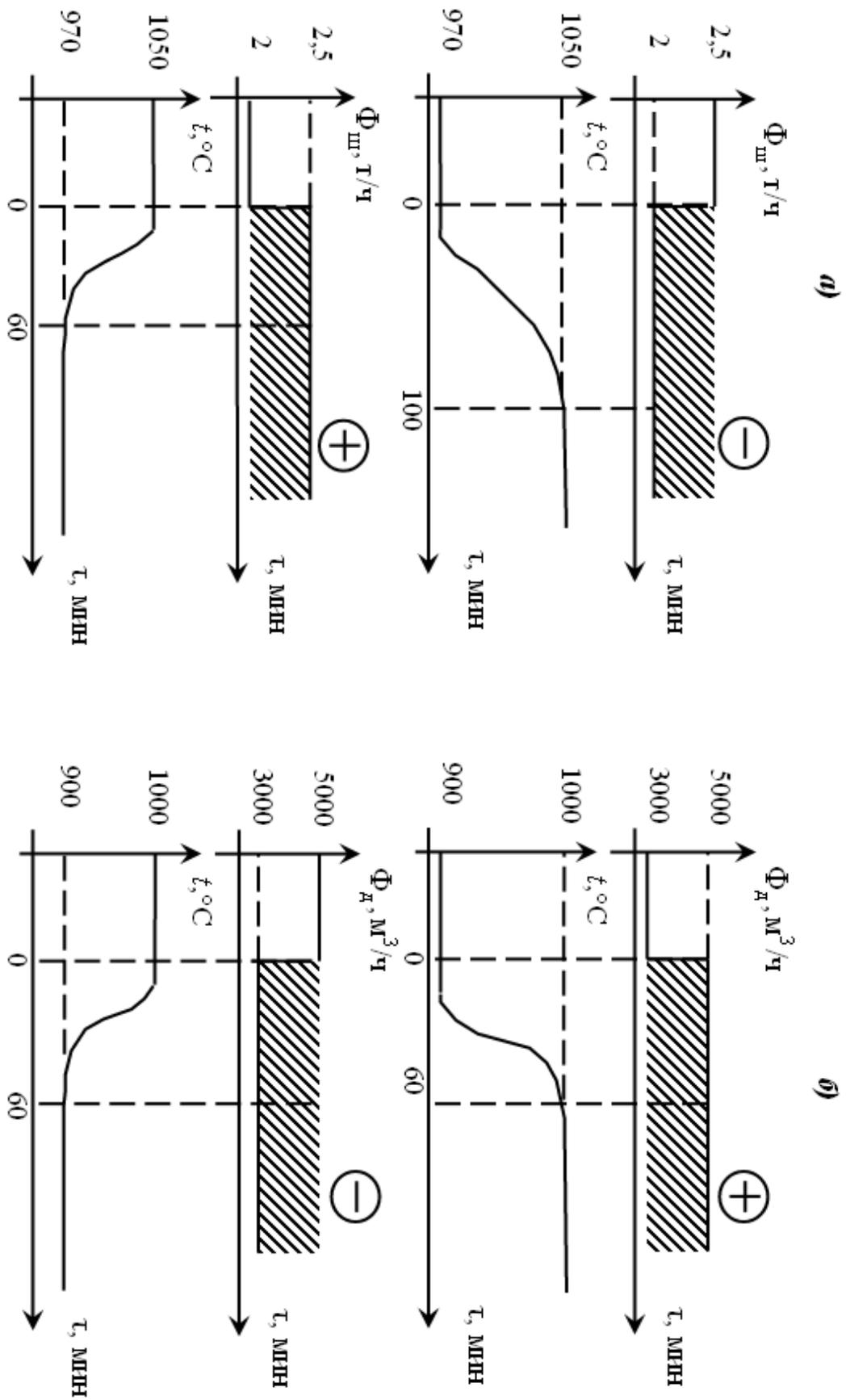


Рис. 4. Графики зависимости изменения температуры огарка по каналам управления подачи: а) шихты, б) дутья

Экспериментальные кривые разгона, объекта по рассматриваемым каналам управления подтверждают правильность описания их передаточными функциями:

$$W_{об}^{III}(\rho) = \frac{K_{об}^{III}}{T_{об}^{III}\rho + 1} e^{-\rho\tau_{об}^{III}}, \quad (7)$$

$$W_{об}^D(\rho) = \frac{K_{об}^D}{T_{об}^D\rho + 1} e^{-\rho\tau_{об}^D}, \quad (8)$$

где по каналу управления («Ф_ш - t»): $K_{об}^{III}$ – коэффициент усиления объекта; $T_{об}^{III}$ – постоянная времени или инерционность объекта; ρ – изображение Лапласу; $\tau_{об}^{III}$ – чистое запаздывание; и те же самые параметры для канала («Ф_д - t») соответственно обозначены: $K_{об}^D$, $T_{об}^D$, $\tau_{об}^D$.

Из характеристик переходного процесса, числовые значения которых представлены в табл. 1, видно, что канал управления по расходу шихты $T_{об}^{III} = 92$ мин имеет большую инерционность по сравнению с каналом управления по расходу дутьевого воздуха $T_{об}^D = 17$ мин. Указанное обстоятельство позволяет считать канал управления по расходу дутьевого воздуха быстродействующим и высокочастотным по сравнению с каналом управления по расходу шихты с нестационарным временем запаздывания τ канала «Ф_ш - t». Как видно из табл. 1 канал управления по расходу дутьевого воздуха обладает большим коэффициентом усиления объекта и меньшим отношением $\tau_{об}^D / T_{об}^D$ ($K_{об}^D = 0,524$; $\tau_{об}^D / T_{об}^D = 0,072$) по сравнению с каналом управления по расходу шихты ($K_{об}^{III} = 0,207$; $\tau_{об}^{III} / T_{об}^{III} = 0,253$). Эти условия позволили выбрать законы регулирования регуляторов-контроллеров по соответствующим каналам управления.

В четвертой главе представлен способ автоматического управления скоростями входящих потоков в форкамере и реакционной камере печи КС; разработана структура самодиагностирующегося и самонастраивающегося контроллера-регулятора для подсистемы компенсации нестационарностей аэродинамических характеристик КС и тракта загрузки шихты в печь КС; разработаны структурно-функциональная схема и алгоритм функционирования интегрированной системы управления; проведена проверка работоспособности предложенного нового способа автоматического управления с использованием реальных характеристик каналов воздействия на температуру обжигаемого никелевого фанштейна и алгоритма стабилизации аэродинамики в камерах печи КС, удовлетворяющая целевым функциям и ограничениям, обоснованным автором.

Обобщенная структура интегрированной системы управления аэродинамическим и температурным режимами процесса обжига никелевого фанштейна в печи КС представлена на рис. 5. При описании структуры системы дальнейшие ссылки осуществляются на рис. 5.

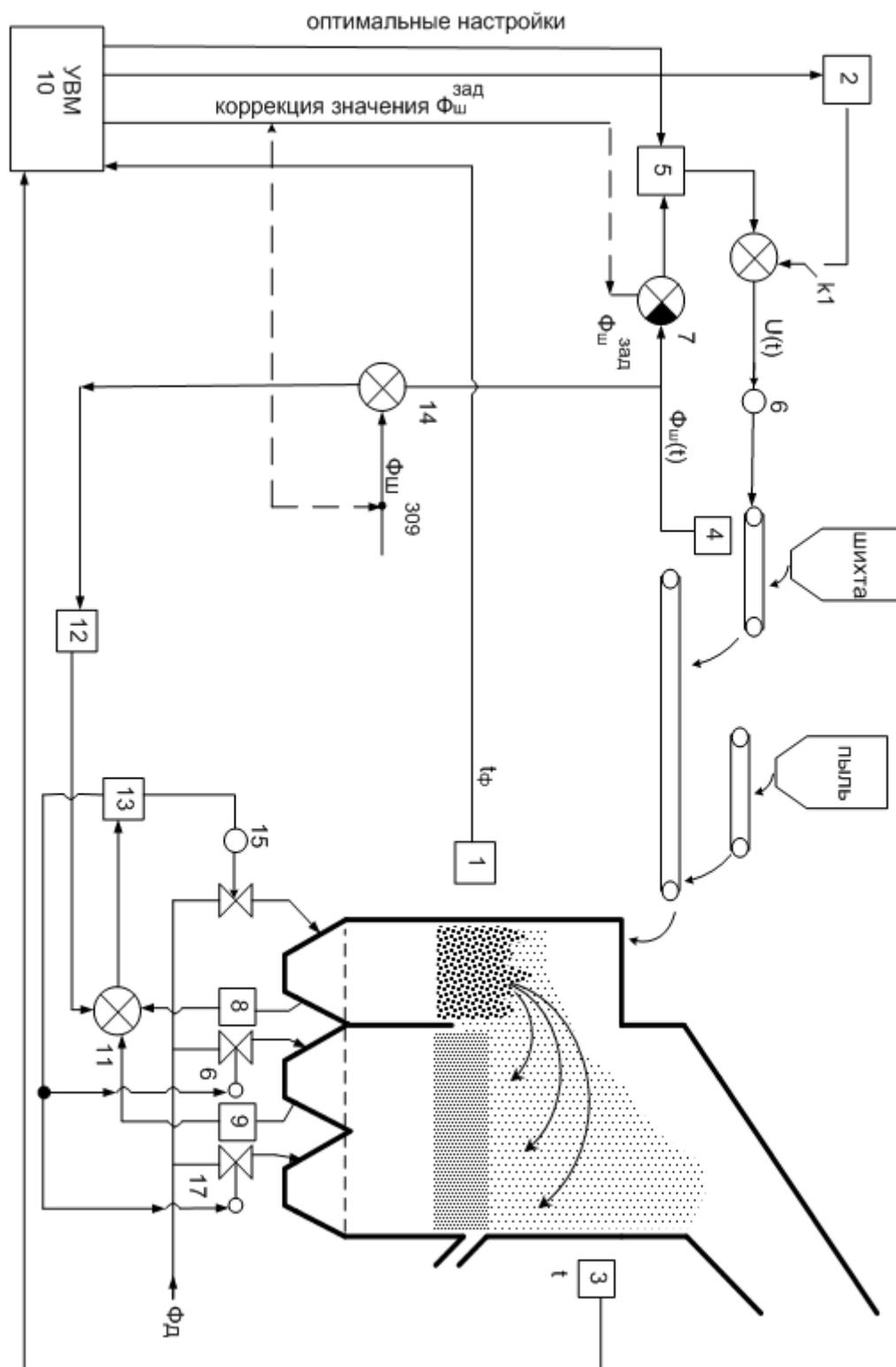


Рис. 5. Обобщенная структура интегрированной системы управления аэродинамическим и температурным режимами процесса обжига никелевого фаянтштейна в печи КС

В структуру системы интегрированы следующие подсистемы:

1. Подсистема автоматической оценки содержания серы в исходной шихте.
2. Подсистема самодиагностики нестабильных параметров динамической характеристики каналов управления процессом обжига в печи КС.
3. Подсистема расчета и самонастройки оптимальных настроек ПИ-регулятора контроллера.
4. Подсистема управления расходом шихты с самонастраивающимся контроллером-ПИ-регулятором.
5. Подсистема управления потоком дутья в печь КС и в форкамеру.

- **Подсистема оценки содержания серы в исходной шихте**

В разработанной подсистеме осуществляется непрерывный контроль температуры в форкамере печи t_f при помощи датчика температуры 1. Текущее значение температуры t_f совместно со значениями расхода шихты и дутья, измеряемые датчиками 4 и 9, соответственно, используются для оценки содержания серы в исходной шихте по регрессионному уравнению (2), структура и коэффициенты которого получены экспериментальными исследованиями на действующем производстве (гл. 2).

При существенном отклонении концентрации серы в исходной шихте от установленного регламентом значения необходимо изменить расход шихты, поступающей в печь, за счет соответствующей коррекции значения уставки в виде значения заданной производительности печи по шихте $\Phi_{ш}^{зад}$. Расчет значения $\Phi_{ш}^{зад}$ осуществляется в УВМ 10 по уравнению теплового баланса математической модели обжига в печи КС (3).

- **Подсистема диагностики параметров динамической характеристики печи КС**

На рис. 6 изображена принципиальная блок-схема подсистемы диагностики параметров системы управления.

На вход объекта 2 подается пробный импульсный сигнал настраиваемой амплитуды, длительности и полярности (Δu , Δt), при этом ключ 4 замыкается на время Δt . Форма импульсного сигнала (значения Δu , Δt) выбирается максимально близкой к δ -функции с учетом реальных возможностей механизмов и с учетом возможности распознать реакцию объекта на фоне шумов, что реализуется блоком 3 формирования пробного сигнала и идентификации параметров.

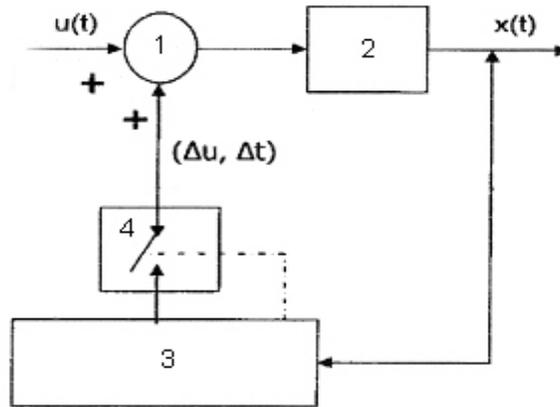


Рис. 6. Принципиальная блок-схема подсистемы диагностики параметров системы управления
 1 – элемент суммирования сигналов; 2 – объект управления; 3 – блок формирования пробного сигнала и идентификации; 4 – нормально открытый ключ.

Настраиваемая полярность пробного сигнала позволяет определить параметры объекта отдельно для изменения выхода в положительном и отрицательном направлениях, что позволит получить более адекватные настройки регулятора 3.

Пробный импульсный сигнал $(\Delta u, \Delta t)$ вызывает переходной процесс, завершающийся тем же значением регулируемой величины $x(0)$, с которой он начинался. В качестве характерных информативных точек используются:

- момент достижения максимума модуля регулируемой величины T_{\max} ;
- максимум модуля разности выхода объекта и его начального значения

$$A = |x(T_{\max}) - x(0)|;$$

- момент T_{beg} достижения модулем разности выхода объекта и его начального значения уровня 5 % от A;
- момент T_{end} спада модуля разности выхода объекта и его начального значения до уровня 70 % от A.

Оценки параметров K_0 , n , T_1 и T_2 модели оцениваются по следующим формулам:

$$n^* = F_1(T_{beg} / (T_{\max} - T_{beg}))$$

$$T_1^* = F_2(T_{beg}, n^*)$$

$$T_2^* = F_3((T_{end} - T_{\max}) / T_1^*, n^*)$$

$$K_0^* = AT_2^* F_4(T_1^*, T_2^*, n^*) / d$$

$$F_1(x) = \left[\frac{13.663x + 1}{-0.256x + 1} \right],$$

где $\left[\frac{13.663x + 1}{-0.256x + 1} \right]$ – целая часть числа $\frac{13.663x + 1}{-0.256x + 1}$, $x = T_{beg} / (T_{max} - T_{beg})$,

$$F_2(T_{beg}, n^*) = \begin{cases} T_{beg} \frac{-0.00181n^* + 1}{0.74152n^* - 0.58415}, & \text{если } n^* \leq 6, \\ T_{beg} \frac{0.0025n^* + 1}{0.88844n^* - 1.39571}, & \text{если } n^* > 6. \end{cases}$$

$$F_3((T_{end} - T_{max}) / T_1^*, n^*) = 0.1T_1^* \frac{-3.7531x + 100}{0.00042x - 1.6156},$$

$$F_4(T_1^*, T_2^*, n^*) = \begin{cases} \frac{0.0065x + 0.8725}{0.1713x + 0.12755} (0.12n^* + 0.49) + 1, & \text{если } n^* \leq 6, \\ \frac{0.004x + 0.96323}{0.1073x + 0.0377} (0.0311n^* + 0.4823) + 1, & \text{если } n^* > 6, \end{cases}$$

где $x = \frac{T_2^*}{T_1^*}$

- **Подсистема расчета оптимальных настроек самонастраивающегося контроллера-ПИ-регулятора**

На вход данной подсистемы поступает информация о текущих значениях параметров объекта управления $K_{об}^{uu}$, T_{ϕ}^{uu} , $T_{кс}^{uu}$, идентифицированных в "Подсистеме диагностики параметров динамической характеристики печи КС". Расчет настроечных коэффициентов ПИ-регулятора осуществляется, исходя из критерия минимума квадратической ошибки регулирования.

Найденные значения оптимальных настроечных коэффициентов поступают на входы самонастраивающегося контроллера-регулятора "Подсистему стабилизации расхода шихты".

- **Подсистема управления расходом шихты**

На вход элемента сравнения 7 подаются выходные сигналы датчика расхода шихты 4 и значение производительности печи КС по шихте $\Phi_{ш}^{зад}$, значение которого определяется в "Подсистеме оценки содержания серы в исходной шихте". Выход элемента сравнения 7 соединен со входом разработанного контроллера-ПИ-регулятора 5, оптимальные настройки которого найдены в Подсистеме расчета оптимальных настроек ПИ-регулятора. (патент по заявке 2001115574).

Соответствующее управляющее значение регулятора при помощи исполнительного механизма δ воздействует через частотный преобразователь дозатора на скорость движения ленты транспортера, осуществляя соответствующую коррекцию потока шихты в печь.

Результаты проверки эффективности работы алгоритмов компенсации колебания температуры в печи, обусловленной флуктуацией содержания серы в исходной шихте, представлены на рис. 7. Была промоделирована ситуация увеличения концентрации серы на 5 % и исследовано изменение температуры в реакционной зоне печи. На рис. 7 (графики слева) представлены данные в случае отсутствия оперативной оценки концентрации серы по температуре в форкамере с последующей своевременной коррекцией количества подаваемой шихты. На рис. 7 (графики справа) представлены температурные зависимости, иллюстрирующие работу представленных в диссертации алгоритмов.

Как видно из рассмотрения рисунков во втором случае имеем менее длительное по времени и по амплитуде отклонения температуры в печи t от оптимального значения, что снижает динамическую ошибку в 3-4 раза по сравнению с существующей САУ рассматриваемого процесса. Таким образом, представленные результаты подтверждают эффективность алгоритмов компенсации параметров характеристики каналов управления "Расход шихты - температура".

- **Подсистема управления потоком дутья в печь КС**

В существующей концепции управления процессами в кипящем слое управляющие воздействия на температуру формируются на статических и динамических математических моделях. Эти воздействия изменяют расход шихты в печь или в форкамеру или расход воздуха под подину печи по величине отклонения температуры и серы от заданных величин. Недостатком этого способа является то, что изменение расхода воздуха в форкамеру не связано с расходом шихты в печь или форкамеру печи, рассчитываемого по алгоритму, представленному в пунктах 4.2–4.3 диссертации.

По этой причине в случаях снижения подачи шихты в форкамеру ниже определенного уровня сопротивление форкамеры с материалом снижается настолько, что расход воздуха в форкамеру резко возрастает, образуя так называемый "фонтанирующий" восходящий поток воздуха. Возникший "фонтанирующий" поток воздуха с собой увлекает псевдооживленный слой мелких частиц (высотой не менее 1,5 м, витающих над поверхностью кипящего слоя) в газоотводящую систему, что приводит к ухудшению работы газоочистных сооружений и выбросу мелких частиц сырья (огарка) в атмосферу. Поскольку в этом случае количество возврата в слой кипящего слоя хаотически движущихся мелких частиц снижается, ухудшается также качество готового огарка.

Таким образом возникает необходимость измерять расход дутья или величину давления дутья под подиной форкамеры и под подиной печи с последующим определением величины отклонения расхода шихты от ее заданного значения, а также разности давления дутья под подиной форкамеры и под подиной печи с одновременной коррекцией этой разности по величине отклонения расхода шихты от ее заданного значения. Пропорционально разности давлений изменяют давление дутья под подиной форкамеры, при этом в интервале от 0,9 до 1,2 от первоначально установившейся величины давления дутья под подиной печи изменение давления дутья под подиной форкамеры не производят.

Камеры печи через запорно-регулирующие органы соединены с общим коллектором сжатого воздуха. На выходы первого элемента сравнения 11 поданы выходные сигналы датчиков давления 8, 9 и функционального блока 12. Выход первого элемента сравнения 11 через регулятор давления воздуха 13 сообщен с запорно-регулирующим органом, установленным на линии подачи воздуха в форкамеру. На вход второго элемента сравнения 14 поданы выходные сигналы датчика расхода шихты 4, датчика задания производительности печи КС по шихте $\Phi_{ш}^{зад}$, например, с пульта управления, а выход элемента сравнения 13 соединен со входом функционального элемента 12. На вход элемента сравнения 13 подается заданное значение $\Phi_{ш}^{зад}$ и измеренное значение расхода шихты в печь КС. Одновременно для заданного значения производительности $\Phi_{ш}^{зад}$ печи КС с помощью запорно-регулирующих органов по известной зависимости (рис. 1) устанавливаются расходы или давление воздуха $P_{норм}$ в камеры печи КС из условия создания в реакционной зоне печи КС скорости воздушного потока $V_{норм}$, характерной для нормального (спокойного) псевдооживленного слоя для всех фракций полидисперсной шихты. После образования спокойного псевдооживленного слоя сопротивление его к прохождению воздуха в направлении газотока практически остается стабильным и в силу этого расход или давление воздуха в камерах печи остаются также постоянными. Из-за высокой стоимости расходомеров расход воздуха предлагается определять через давление воздуха. Установившиеся значения давления воздуха в камеры печи измеряют датчиками 8 и 9, и выходные сигналы подают на входы элемента сравнения 11, куда одновременно подают также сигнал отклонения заданной и текущей величины расхода шихты в форкамеру печи КС. Плавным изменением расхода шихты или его влажности, расхода воздуха в камеры печи устанавливают заданное значение температуры материала в КС.

Как было сказано ранее, в процессе непрерывной работы печи КС подача шихты в форкамеру изменяется в широких пределах (зависание шихты в распределителе, неподвижная остановка питателя и т.д.). Чрезмерно резкое увеличение подачи шихты в форкамеру приводит к нарушению ее работоспособности – к заваливанию подины, а уменьшение – к

резкому увеличению расхода воздуха через форкамеру, т.е. к образованию "фонтанирующего" восходящего потока над кипящим слоем материала. В последнем случае все витающие в печи частицы будут увлечены этим потоком в газоходную систему, что снижает эффективность работы газоочистных сооружений и обуславливает резкое увеличение пылевыноса в атмосферу. Для исключения этого явления выходные сигналы датчиков давления 8 и 9 (или расходов) непрерывно сравнивают на первом элементе 11 и по величине отклонения изменяют расход воздуха в форкамеру при помощи регулятора 13 с запорно-регулирующим органом до полного выравнивания давлений в камерах печи. Для повышения эффективности применения предлагаемого способа выходной сигнал второго элемента сравнения 14 через функциональный элемент 12 подают также на один из входов первого элемента сравнения 11 и тем самым способствуют исключению залегания материала в форкамере или образования фонтанирующего восходящего потока воздуха в форкамеру вводят опережающий сигнал. Функциональный элемент в простейшем варианте должен реализовать функцию:

$$U_{\text{вых}}^{\Phi(\tau)} = k_1 \zeta_1(\tau) + k_2 \frac{d\zeta_1(\tau)}{d\tau}, \quad (9)$$

где $U_{\text{вых}}^{\Phi(\tau)}$ – выходной сигнал функционального элемента 12; k_1 и k_2 – эмпирические коэффициенты; $\zeta_1(\tau)$ и $\frac{d\zeta_1(\tau)}{d\tau}$ – величина отклонения расхода шихты от заданного значения $Q_{\text{зад}}^u$ и его производная по текущему времени τ .

Поскольку первоначально установленные значения расхода шихты и давления (расхода) воздуха в камеры печи непрерывно находятся в режиме флуктуации, то до зоны возможного начала выноса мелких частиц, витающих над слоем кипящего слоя с подиной печи 1, равной $0,9P_{\text{норм}}$, и возможного залегания средних частиц на форкамере, равной 1,2 (рис. 1) от первоначально установившейся величины давления под подиной форкамеры $P_{\text{норм}}$, регулирование расходов шихты и давления (расхода) воздуха не производят.

Использование предложенного алгоритма управления подачей дутья в печь КС (в диссертации) позволит исключить возможность образования фонтанирующего восходящего потока через форкамеру во всех режимах работы печи КС, значительно снизить пылевынос с верхней зоны псевдооживленного слоя, что одновременно должно повышать качество готового огарка и снижать потери цветных металлов. Испытание отдельных подсистем и алгоритмов в промышленных условиях работы печи КС-1 на ОАО «Южуралникель» подтвердили снижение динамической ошибки управления температурным режимом в 3-4 раза (рис. 7) и снижение пиковых пылевыбросов на 15-20 % при соблюдении установленных ограничений по технологическим параметрам процесса обжига (акты и протоколы имеются).

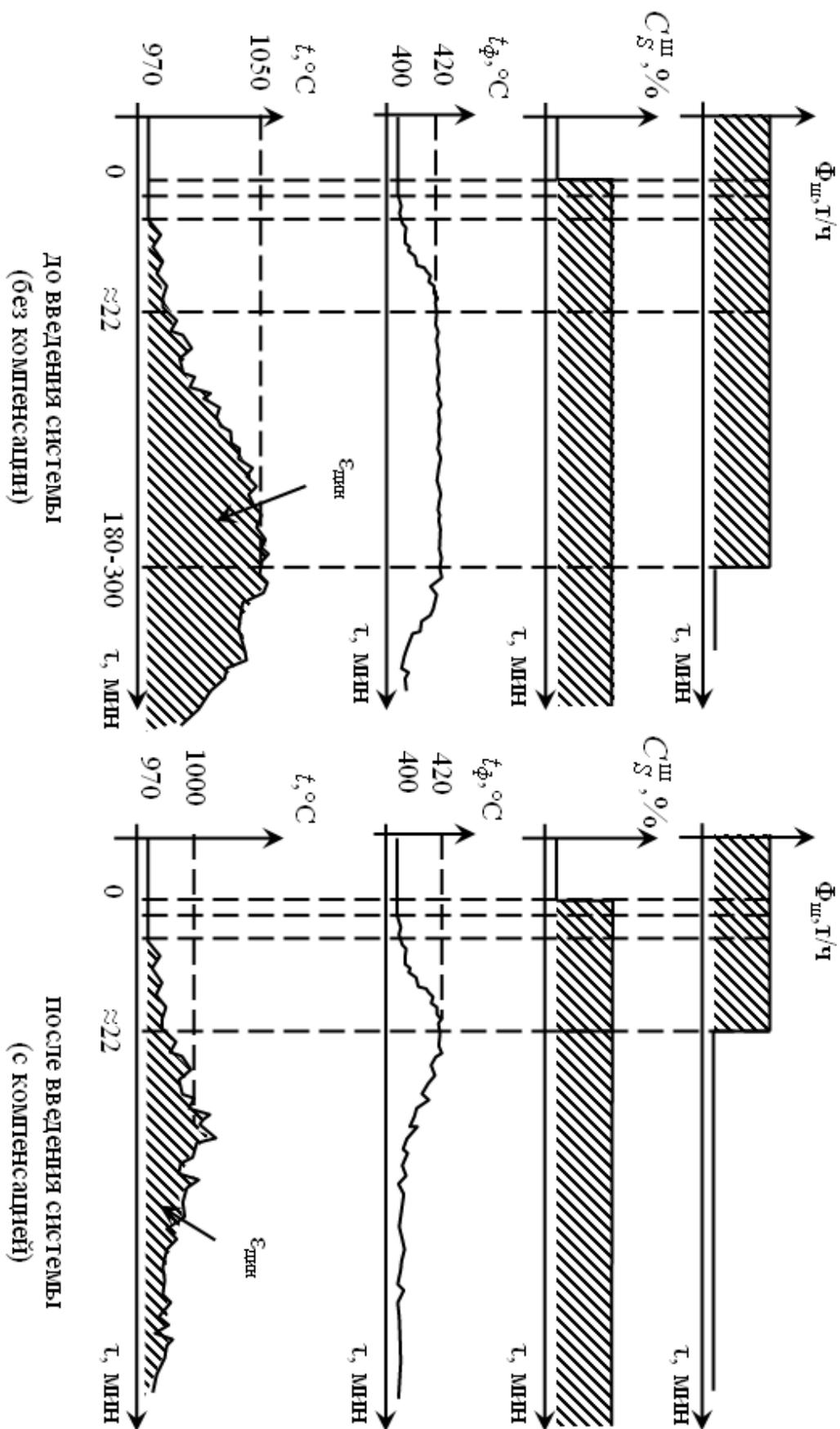


Рис. 7. Анализ изменения динамической ошибки управления температурным режимом с введением системы

Заключение и выводы по работе:

Совокупность результатов исследований, сформулированных на основе анализа состояния техники и научно-технических вопросов, представляет собой решение научно-технической актуальной задачи создания «Интегрированной системы автоматического управления аэродинамическим и температурным режимами процесса обжига измельченного никелевого файнштейна в печи КС с форкамерой». Это утверждение обосновано математическим моделированием и экспериментальными исследованиями на реальном объекте, результаты которых подтверждают снижение динамической ошибки регулирования температуры огарка в 3-4 раза и пиковых выбросов пыли на 15-20 %, что одновременно подтверждает значительное улучшение качества готового огарка и повышение надежности газоочистного оборудования и самой печи КС.

К основным выводам диссертационной работы следует отнести:

1. Для информационной поддержки базовых законов управления процессом обжига полидисперсных материалов в псевдооживленном слое установлена закономерность изменения температуры в форкамере печи КС в зависимости от содержания серы в загружаемой в печь шихте – никелевом файнштейне смешанной с оборотной пылью. Это позволяет с опережением выработать в САУ воздействия компенсирующие влияние одного из основных возмущений (серы в шихте) на температуру материала в КС, что направлено на снижение динамической ошибки по температуре.

2. Разработана математическая модель процесса обжига измельченного файнштейна и экспериментальными исследованиями определены численные значения неизвестных коэффициентов идентификации, что позволило провести без экономических затрат изучение параметров и свойств динамических и статических характеристик каналов управления рассматриваемым в работе процессом.

3. Предложен способ автоматической оптимальной импульсной настройки контроллерной системы управления, основанный на переводе замкнутой системы в разомкнутый режим, подачи пробного сигнала на вход объекта, измерении переходного процесса, определении по ним параметров K_0 , n , T_1 , T_2 принятой модели объекта управления в виде передаточной функции $W(p) = K_0 / (T_1 p + 1)^n (T_2 p + 1)$, определении по параметрам модели оптимальных параметров настройки регулятора-контроллера и переводе системы с оптимальными параметрами настройки в рабочий режим, отличающийся тем, что в качестве пробного сигнала использован импульсный сигнал с настраиваемыми амплитудой, длительностью и полярностью (патент по заявке на изобретение 2001115574).

4. Разработка структуры и алгоритм функционирования самодиагностирующегося и самонастраивающегося контроллера-регулятора для компенсации выявленной в работе не-

стационарности параметров характеристики канала управления «шихта – температура огарка» (патент на изобретение по заявке 2001115574).

5. На уровне патентов на изобретения России, разработаны два способа автоматического управления температурным и аэродинамическим режимами процесса обжига измельченного никелевого файнштейна в печи КС с форкамерой (патенты 2265779. Бюлл.34 от 10.12.2005 г. и 2293936. Бюлл.5 от 20.02.2007 г.). Способы реализованы в созданной интегрированной системе управления, а подробное описание их дано в Интернете ФИПС РФ.

6. Разработаны алгоритмы программирования математических моделей функционирования САУ аэродинамическим и температурным режимами процесса обжига, а также блок-схема интегрированной САУ-КС, совокупность которых обеспечивает 2^х критериальное управление процессом обжига измельченного никелевого файнштейна в печи КС с форкамерой с соблюдением сформулированных технологических ограничений на управляющие воздействия.

7. С использованием результатов исследований автора составлено техническое задание на проектирование интегрированной САУ процессом обжига никелевого файнштейна в печи КС-1 ОАО «Южуралникель». ТЗ и разработанное программное обеспечение приняты Заказчиком для внедрения по 1-ой очереди АСУ-КС обжигового цеха.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Способ автоматического управления процессом обжига металлургического сырья в печи кипящего слоя. Авторы: Салихов З.Г., Щетинин А.П., Крыжановский А.П., Кимяев И.Т., Салихов М.З. – Патент на изобретение РФ № 2265779. Бюлл.34 от 10.12.2005 г.
2. Васильев Р.Р., Салихов М.З. Надежность и диагностика автоматизированных систем. М: ГТУ МИСиС, Издательство «Учеба». 2005, с.91.
3. Шубладзе А.М., Салихов З.Г., Салихов М.З. и др. Высоконадежное управление потоками жидкостей и газов с помощью АНАП – регулятора //М: Изв. вузов «Цветная металлургия». № 5. 2005. с. 75-79.
4. Способ управления процессом обжига металлургического сырья в печи кипящего слоя и ее остановки. Авторы: Салихов З.Г. и Салихов М.З. Патент на изобретение 2293936. Бюлл.2 от 20.01.2007 г.
5. Способ автоматической оптимальной импульсной настройки системы управления. Авторы: Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Салихов З.Г., Салихов М.З. Патент на изобретение по заявке 2001115574.

6. Салихов М.З. Математическая модель непрерывной оценки содержания серы в никельсодержащей шихте при ее обжиге в печи кипящего слоя с форкамерой. Моделирование, идентификация, синтез систем управления //Сб. тезисов девятой Международной научно-технической конференции. Москва – Донецк: Изд. института прикладной математики и механики НАН Украины. 2006. с. 14-15.
7. Салихов М.З. Адаптивные кусочно-непрерывные регуляторы (АКН – регулятора). Моделирование, идентификация, синтез систем управления.//Сб. тезисов десятой Международной научно-технической конференции. Москва – Донецк: Изд. Института прикладной математики и механики НАН Украины 2007 г., с.27-28.
8. Салихов М.З. Повышение качества управления температурным режимом процесса обжига никельсодержащих руд. М: ГТУ «МИСиС», 62 дни науки аспирантов и студентов МИСиС: международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. М: 2007. с.13-14.
9. Салихов М.З., Сириченко А.В. системы управления подачей дутья в печь кипящего слоя. Моделирование, идентификация, синтез систем управления. //Сб.тезисов 11-ой Международной научно-технической конференции. Изд. Института прикладной математики и механики НАН Украины. 2008. с.188.
10. Салихов З.Г., Ишметьев Е.Н., Салихов М.З. и др. Асимптотические методы регуляризации сингулярно-возмущенных стохастических задач оптимального управления. М: Изв. ВУЗов «Черная металлургия», № 1. 2008, с.60-63.