

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Скоробогатова Инна Валерьевна



УДК 621.783.232:004.942:681.5.013:608.2

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМИ РЕЖИМАМИ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ**

Специальность 05.13.07 - Автоматизация процессов управления

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

Красноармейск – 2014

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена в Государственном высшем учебном заведении «Донецкий национальный технический университет» Министерства образования и науки Украины

**Научный
руководитель:**

кандидат технических наук, доцент
Гавриленко Борис Владимирович,
доцент кафедры горной электротехники и
автоматики им. Р.М. Лейбова
ГВУЗ «Донецкий национальный технический
университет»

**Официальные
оппоненты:**

доктор технических наук, профессор
Ткачев Виктор Васильевич,
заведующий кафедрой автоматизации и
компьютерных систем
ГВУЗ «Национальный горный университет»;

доктор технических наук, профессор
Чепцов Михаил Николаевич,
заведующий кафедрой автоматизации,
телемеханики, связи и вычислительной
техники
ГВУЗ «Донецкий институт железнодорожного
транспорта Украинской государственной
академии железнодорожного транспорта».

Защита состоится «20» ноября 2014 г. в 12.00 часов на заседании специализированного ученого совета Д11.052.03 Донецкого национального технического университета по адресу: 85300, г. Красноармейск, пл. Шибанкова, 2, корп. 1, ауд. 1.211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 85300, г. Красноармейск, пл. Шибанкова, 2.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь специализированного
ученого совета Д11.052.03
кандидат технических наук, доцент



Г. В. Мокрый

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основными потребителями природного газа на металлургических и машиностроительных предприятиях являются пламенные камерные печи, предназначенные для нагрева и отжига заготовок по заданной технологической карте. Себестоимость готового продукта зависит от энергозатрат на создание тепловой атмосферы в камере печи.

В настоящее время в Украине управление процессом нагрева заготовок в камерной печи осуществляется по традиционной пропорциональной схеме подачи топлива в зависимости от периода нагрева. При этом не выполняется требование поддержания соотношения «топливо-воздух», при котором обеспечивается полное сгорание газа.

Вместе с тем, в качестве энергосберегающей известна импульсная технология подачи топлива, согласно которой за счет гибкого управления частотой подачи теплотворной смеси и периода работы каждой из групп горелок, обеспечивается интенсификация процесса нагрева заготовок за счет полного сгорания газа, что приводит к повышению теплоотдачи от газа к металлу. Таким образом, за счет достижения однородной печной атмосферы при сокращенном цикле нагрева заготовок повышается коэффициент использования топлива, который характеризует эффективность сжигания дорогостоящего газа. Экономия природного газа при сжигании в импульсном режиме достигает 10-15%.

Системы управления импульсной подачей топлива в камерную печь более 12 лет используются в Европе и, в последние годы, в США. Известны концепция, технические средства и алгоритмы управления сжиганием топлива в печи с использованием импульсных горелок, разработанных фирмой «Kromschroder». Однако адаптация таких средств и систем импульсной подачи топлива для камерных печей Украины связана с реализацией принципиально новой структуры системы управления и необходимостью перестройки алгоритма под конкретные технологические режимы работы. Следовательно, разработка системы автоматического управления (САУ) нагревом заготовок в пульсирующем режиме подачи теплоносителя (ПРПТ) в камерную печь (КП), а также исследование ее структуры и параметров, влияющих на интенсификацию процесса теплообмена, представляет актуальную задачу.

Следует отметить, что задачами в области моделирования и автоматизации нагревательных печей, а также исследованиями импульсной подачи топлива в печь занимался ряд ученых, среди которых Ю.Н. Шаламов, Б.В. Изотов, Ю.Г. Качан, G. Kromschroder, Д. А. Ковалюк, С.М.Москвина, В.Н. Ткаченко, А.Б.Бирюков, А.С. Гиневский, Е.В. Власов, А.А. Жукаускас А.А., J.Govardhan, G.V.S.Rao и другие ученые. Диссертационная работа является продолжением исследований и разработок в направлении проектирования системы автоматического управления нагревом заготовок в пламенных нагревательных печах периодического действия.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в соответствии с тематическим планом Донецкого национального технического университета по гостеме НИР ДонНТУ Н 27-10 «*Дослідження та удосконалення автоматизованої системи управління процесом підготовки слябів в методичної нагрівальної печі*».

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка системы автоматического управления нагревом заготовок в пульсирующем режиме, позволяющей повысить эффективность функционирования камерной печи путем синхронного изменения подачи топлива группами горелочных устройств.

Для достижения цели в работе решаются следующие **задачи**:

1. Исследование процесса нагрева заготовок в камерной печи как объекте управления с учетом изменения теплового режима подачи топлива.
2. Разработка физической модели камерной печи для проведения экспериментальных исследований по установлению рациональных параметров в контуре управления пульсирующей подачей топлива.
3. Разработка и исследование математической модели нагрева заготовок в камерной печи как объекте управления с учетом теплофизических особенностей пульсирующего режима сжигания топлива.
4. Разработка структуры и моделирование САУ для оценки теплового состояния заготовок в пульсирующем режиме подачи топлива в камерную печь.
5. Разработка технических решений по реализации САУ нагревом заготовок в пульсирующем режиме подачи топлива в камерную печь.

Объект исследований – процесс нагрева заготовок и система автоматизированного управления отоплением камерной печи.

Предмет исследований – математическая модель и САУ процессом нагрева заготовок в пульсирующем режиме подачи топлива в камерную печь.

Методы исследования. При разработке математической модели нагрева заготовок в камерной печи в условиях импульсной технологии использовались методы теории горения газообразного топлива, теории теплообмена, декомпозиции, статистического и регрессионного анализа, конечно-разностной аппроксимации и уравнений математической физики. При разработке САУ использовались методы упреждающей коррекции, синхронного детектирования, синхронизирующего управления. В качестве средства моделирования применен блочно-ориентированный язык моделирования *Simulink*.

Научная новизна полученных результатов.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

Экспериментально установлено частотный диапазон периода пульсирующего режима подачи топлива в камерную печь, положенный в основу для разработки системы автоматического управления нагревом заготовок.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Получила дальнейшее развитие математическая модель нагрева заготовок в камерной печи, которая отличается от известных тем, что учитывает изменение температуры металла за счет сохранения равенства поглощаемых заготовками тепловых потоков в пульсирующем и традиционном режимах сжигания топлива в камерной печи.

2. Впервые предложен метод упреждающего управления на основе прогнозирующей модели для базового режима работы камерной печи, позволяющей определять расход природного газа на заданном горизонте управления.

3. Впервые предложен метод синхронизирующего управления для синтеза САУ в пульсирующем режиме подачи топлива в камерную печь, основанный на определении согласующей матрицы коэффициентов, использование которой позволит поддерживать регулируемые соотношения по каналам управления с учетом изменения сортамента нагреваемых заготовок.

4. Установлен оптимальный диапазон переключения горелок в пульсирующем режиме подачи топлива от 2-8,3 секунд, обеспечивающий однородную печную атмосферу, и рациональная область настроек регулятора системы управления, позволяющая сократить цикл нагрева заготовок до 3% и снизить расход топлива до 9,6%.

Практическая значимость полученных результатов

1. Разработана блочно-ориентированная *Simulink*-модель процесса нагрева заготовок в камерной печи как объекта управления, что позволяет исследовать статические и динамические характеристики в зависимости от теплофизических параметров материала и конструктивных особенностей печи.

2. Разработано программное обеспечение для оценки теплового состояния заготовки в пульсирующем режиме подачи топлива на основе метода конечных разностей и алгоритма Томаса, которое отличается способом задания граничных условий с использованием метода синхронного детектирования.

3. Разработана и запатентована физическая модель, позволяющая исследовать параметры системы управления в зависимости от способа подачи теплоносителя в камерную печь.

4. Разработана блочно-ориентированная *Simulink* - модель управления процессом нагрева заготовок в пульсирующем режиме подачи топлива в камерную печь, позволяющая рассчитывать упреждающие воздействия в зависимости от заданной технологической карты с учетом тепловых процессов в рекуператоре.

5. Предложены структура и комплекс технических средств реализации САУ в пульсирующем режиме подачи топлива в камерную печь, позволяющие формировать управляющее воздействие через два регулятора температуры на распределители каждой из групп горелочных устройств для синхронизации их работы.

Личный вклад соискателя. Автором лично разработаны: математическая и блочно-ориентированная *Simulink*-модель процесса и САУ нагрева заготовок в пульсирующем режиме подачи теплоносителя в камерную печь при помощи метода конечных разностей, синхронного детектирования, упреждающей коррекции, синхронизирующего управления.

Апробация. Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на конференциях: на XI, XIII, XIV Международных научно-технических конференциях аспирантов и студентов в г. Донецк «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих» (ДонНТУ, 2011, 2013, 2014 гг.); на I Международной молодежной научной конференции «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів» м. Донецк, 2013 р.; на XII, XIII, XV Международных научных конференциях "Севергеоэкотех", г. Ухта, (2011, 2012, 2014 гг.), на XI Международной научной конференции «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)» в м. Вінниця, 9-11 жовтня 2012 р.; на IV Международной научной конференции «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу» в м. Дніпропетровськ, 1-3 листопада, 2012 року, а также на научных семинарах факультета компьютерных информационных технологий и автоматизации Донецкого национального технического университета.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 18 печатных работах, из них 8 статей – в изданиях, внесенных в перечень профессиональных научных изданий Украины, 9 в трудах международных научно-технических конференций, получен 1 патент.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов и заключения. Она включает 190 страниц машинописного текста, в том числе 134 страницы основного текста, 58 рисунков и 16 таблиц, список использованной литературы из 118 наименований на 14 страницах, 8 приложений на 42 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе «Состояние проблемы управления нагревом заготовок в камерной печи в условиях импульсной технологии» исследованы особенности технологического процесса нагрева заготовок в зависимости от режима тепловой обработки и способа подачи топлива в КП.

Для анализа процесса нагрева заготовок в камерной печи как объекте управления выбраны три группы марок стали, включающих до 57 наименований. В среде *MathCAD* определены параметры теплового баланса КП в зависимости от заданного технологического режима термообработки $t_d(\tau)$, и получены статические характеристики температуры поверхности заготовки t_{pv} , перепада температур по ее сечению Δt и расхода газа V_g для периода основного нагрева (ОМП) и периода выдержки (ПВ) (рис.1, табл. 1).

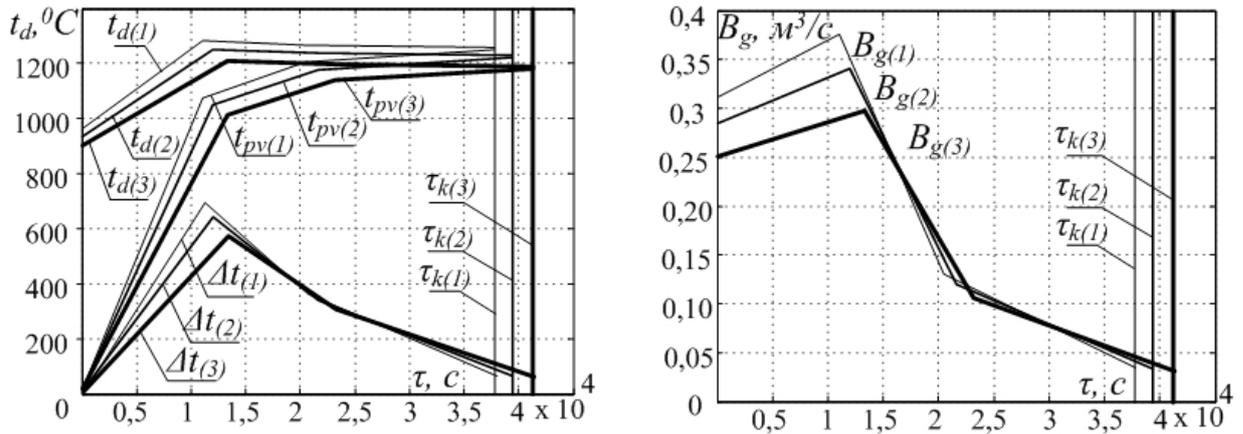


Рис.1. Сравнительная характеристика тепловых процессов в КП для 3-х групп марок сталей ($t_{pvk_1} = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{pvk_2} = 1220 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{pvk_3} = 1180 \text{ }^{\circ}\text{C}$;)

Установлено, что с ростом температуры поверхности металла t_{pvk} с 1180 до 1250 $^{\circ}\text{C}$ (на 5,9%) время нагрева τ сокращается с 11,5 до 10,5 часов (на 8,9%), а максимальный расход газа B_g , который соответствует периоду основного нагрева, возрастает с 1068 до 1346 $\text{м}^3/\text{ч}$ (на 26%) (рис.1), то есть сокращение времени нагрева τ в традиционном режиме подачи топлива (ТРПТ) в КП на 1% приводит к росту расхода природного газа B_g на 3%.

Табл.1. Параметры теплового баланса в ТРПТ и ПРПТ в камерную печь

Гр. ст.	$t_d, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$q_t, \text{ Вм}/\text{м}^2$	$q_p, \text{ Вм}/\text{м}^2$	η_t	η_p	$\Delta\eta$	ΔB_g
1	1250	$1,51 \cdot 10^5$	$2,97 \cdot 10^5$	0,58	0,64	10,3%	9,6%
2	1220	$1,39 \cdot 10^5$	$2,78 \cdot 10^5$	0,59	0,65	10,2%	9,1%
3	1180	$1,24 \cdot 10^5$	$2,56 \cdot 10^5$	0,61	0,66	8,2%	8,6%

Эффективность КП оценивается коэффициентом использования топлива (КИТ) η и распределением температур по сечению заготовки Δt .

Применение ПРПТ позволяет повысить КИТ η_p до 10,3% и снизить расход топлива B_g на 9,6% (табл. 1) за счет интенсивного перемешивания газов в печной атмосфере и сокращения цикла нагрева заготовок τ на 3%.

Качество регулирования температуры продуктов сгорания в ПРПТ не соответствует заданным технологом требованиям, что указывает на необходимость поддержания скорости нагрева металла $dt_m/d\tau$.

Условие выполняется при стабилизации значений поглощаемых заготовками тепловых потоков в ПРПТ и ТРПТ.

Существующие в Украине системы автоматизации процессом нагрева заготовок в камерной печи не выполняют это требование. Управление ПРПТ для камерной печи предполагает решение задач анализа, синтеза, а также предложений технических решений по реализации системы управления.

Второй раздел «Разработка и исследование математической модели нагрева материалов в ПРПТ в камерную печь» посвящен анализу процесса

нагрева заготовок в КП как многосвязного объекта управления, выбору параметров, разработке математической модели и экспериментальному исследованию параметров для синтеза САУ на спроектированной физической модели камерной печи.

Технологический процесс нагрева заготовок в КП представлен структурной схемой управления тепловыми потоками в период основного нагрева, период выдержки и нагрева воздуха в рекуператоре КП (рис.2).

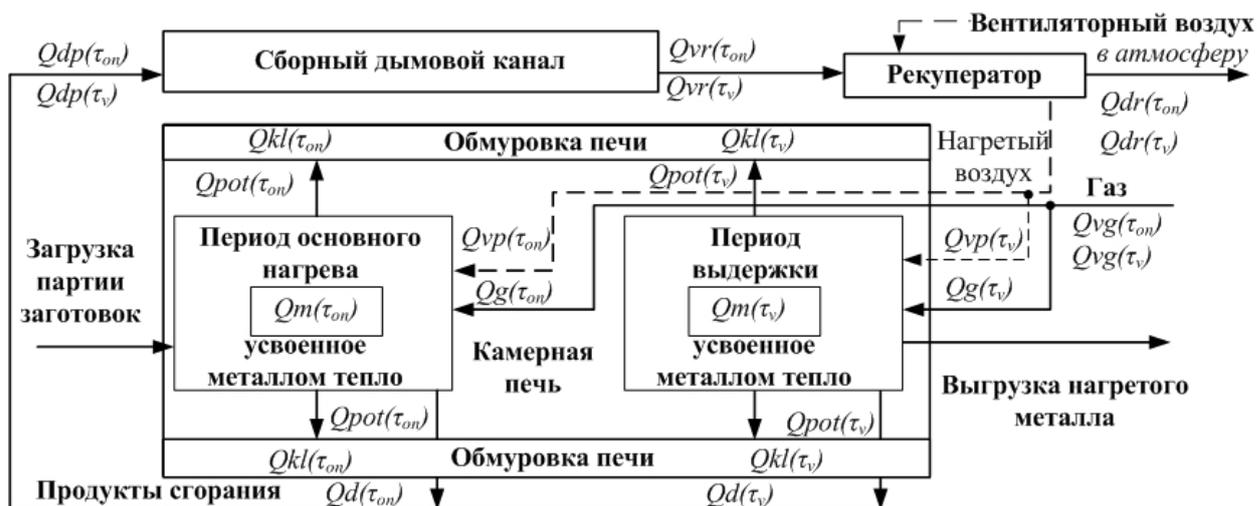


Рис.2. Структурная схема управления тепловыми потоками в периоды работы камерной печи

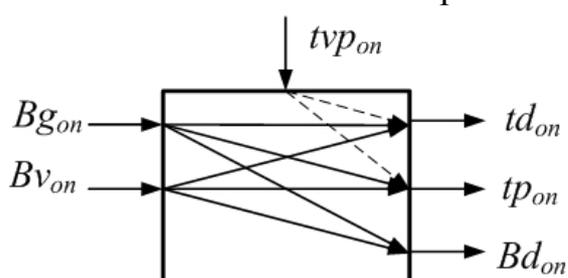


Рис.3. КП как объект управления в период основного нагрева

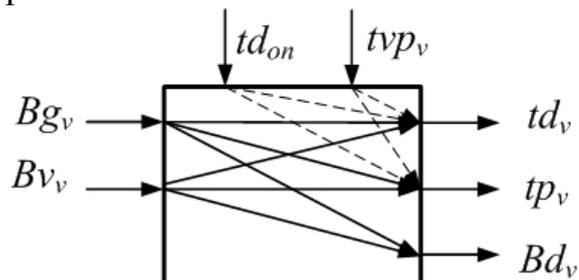


Рис.4. КП как объект управления в период выдержки

Структурно-временная декомпозиция процесса (рис. 3, рис.4) в зависимости от теплового периода позволила выделить следующие параметры: *управляющие* – расход газа B_g и расход воздуха B_v ; *возмущающие* – температура воздуха после рекуператора t_{vp} и температура продуктов сгорания t_d , которая влияет на тепловое состояние печи в ПВ; *управляемые* – температура продуктов сгорания t_d ; *контролируемые* – температура печи t_p , расход продуктов горения B_d .

Получены статические и динамические уравнения в период основного нагрева и выдержки в ПРПТ в камерную печь.

Динамическое уравнение температуры продуктов сгорания t_d в ОНП в КП:

$$\frac{1}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} V_k \cdot C_d(t_d) \cdot \frac{dt_d}{d\tau} d\tau = (Q_{nr} + V_v \cdot C_v(t_v) \cdot t_v - V_d \cdot C_d(t_d) \cdot t_d) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{on}} \cdot m \cdot 0,5 \cdot \int_0^{\tau_{on}} B_g(\tau) d\tau + \frac{1}{\tau_{on}} \cdot n \cdot 0,5 \cdot \int_0^{\tau_{on}} B_g(\tau) d\tau \right) - F_m \cdot \frac{1}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} q d\tau - \frac{1}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} Q_{pot} d\tau$$

где $k = m + n$; k – общее количество горелочных устройств; $0,5 \cdot m \cdot B_g, 0,5 \cdot n \cdot B_g$ – суммарное количество газа в ОНП и ПВ, которое поступает через I группу и II группу горелок в количестве m и n штук.

Динамическое уравнение температуры в камерной печи t_p в ОНП:

$$\frac{1}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} V_k \cdot C_p(t_{pon}) \cdot \frac{dt_p}{d\tau} d\tau = (Q_{nr} + V_v \cdot C_v(t_v) \cdot t_v - V_d \cdot C_d(t_d) \cdot t_d) \cdot \left(\frac{1}{\tau_{on}} \cdot m \cdot 0,5 \cdot \int_0^{\tau_{on}} B_g(\tau) d\tau + \frac{1}{\tau_{on}} \cdot n \cdot 0,5 \cdot \int_0^{\tau_{on}} B_g(\tau) d\tau \right) - F_m \cdot \frac{1}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} q d\tau - \frac{1}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} (Q_{pot} - \alpha_{tp} \cdot F \cdot (t_{pon}(\tau_{on}) - t_{os})) d\tau$$

Динамическое уравнение расхода продуктов сгорания B_d в ОНП в КП:

$$\frac{T_{on}}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} \frac{dB_d(\tau)}{d\tau} d\tau + \frac{1}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} B_d(\tau) d\tau = m \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} (B_g(\tau) + B_v(\tau)) d\tau + n \cdot 0,5 \cdot \frac{1}{\tau_{on}} \cdot \int_0^{\tau_{on}} (B_g(\tau) + B_v(\tau)) d\tau;$$

Аналогичными уравнениями описываются динамические процессы в период выдержки.

Реализация ПРПТ в камерную печь в виде синусоидальной функции достигается скоростным переключением групп горелок по следующей схеме управления (рис.5):

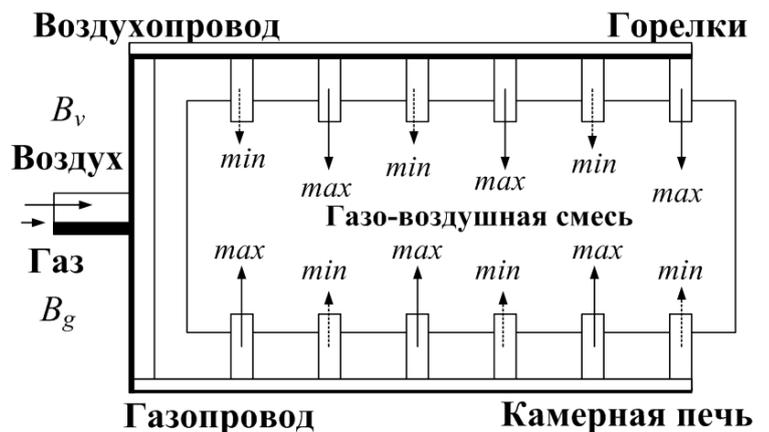


Рис. 5. Схема подачи топлива в ПРПТ в камерную печь

Разработана блочно-ориентированная *Simulink*-модель процесса внешнего теплообмена на основе выведенных динамических уравнений, представленных в векторно-матричной форме. Методом математического моделирования установлено, что изменение расхода газа в ОНП в

диапазоне $B_g = 126 \div 152 \text{ м}^3 / \text{ч}$ связано с изменением заданной температуры поверхности металла t_{pvk} в ПВ на $30 \div 40 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис.6, рис.7). Полученные динамические характеристики температуры и расхода продуктов сгорания имеют вид аperiodического звена первого порядка.

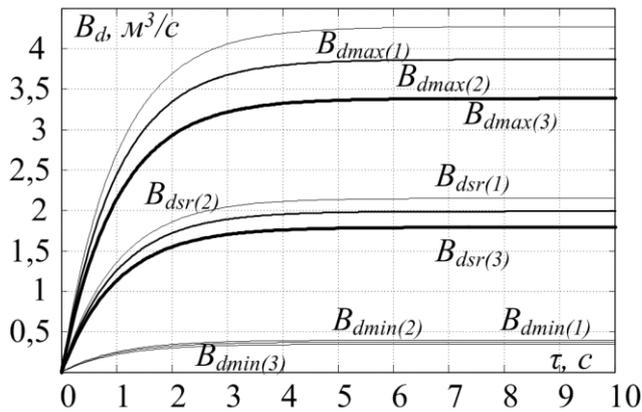


Рис.6. Динамическая характеристика расхода продуктов сгорания

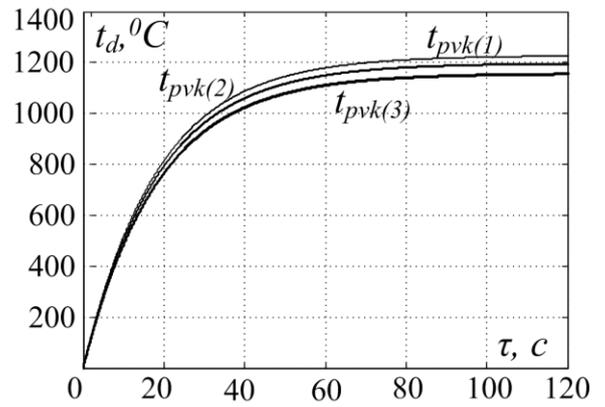


Рис.7. Динамическая характеристика температуры продуктов сгорания

Методом конечно-разностной аппроксимации на основе неявной схемы разработана математическая модель и файл-программа (*Script M-files*) определения теплового состояния заготовки.

Прогночные коэффициенты определены по алгоритму Томаса.

Распределение температур по сечению заготовки прямоугольной формы описано одномерным дифференциальным уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$C(t_m) \cdot \rho(t_m) \cdot \frac{\partial t_m(\tau, R)}{\partial \tau} = \frac{\lambda(t_m)}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial t_m}{\partial r} \right),$$

с начальными и граничными условиями третьего рода:

$$\begin{aligned} \tau = 0: & \quad t_m = t_{m0}, \quad 0 \leq R \leq R_{sl} \\ R = 0: & \quad \frac{\partial t_m}{\partial r} = 0, \quad R = R_{sl}: \quad \lambda \cdot \frac{\partial t_m}{\partial r} = \alpha_{tp_p} \cdot (\bar{t}_d - t_m), \quad \alpha_{\Sigma} > 0 \end{aligned}$$

где α_{tp_p} – коэффициент конвективной теплоотдачи в ПРПТ в КП, который определяется средней температурой продуктов сгорания с групп датчиков температуры.

На рисунках 8 и 9 показаны результаты определения температурного поля в радиусе цилиндра $R = 0,5 \text{ м}$.

Материал заготовки – сталь 40 ($\rho = 7700 \text{ кг/м}^3$).

Начальная температура металла $t_{m0} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значения коэффициента теплопроводности $\lambda(t_m)$ и теплоемкости металла $C(t_m)$ изменяются в процессе нагрева заготовки.

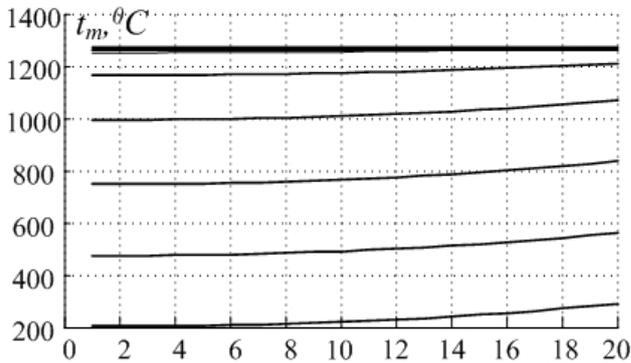


Рис.8. Температурное поле ст.40

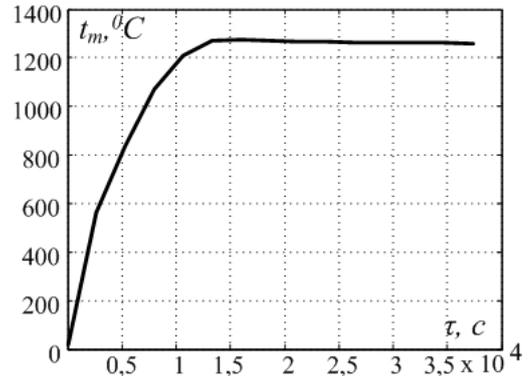


Рис.9. Температура поверхности заготовки ст.40

Разработана обобщенная математическая модель нагрева заготовок в камерной печи с учетом сохранения скорости нагрева металла в ПРПТ:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \cdot \int_0^{\tau_{\Sigma}} V_k \cdot C_p(t_p) \cdot \frac{dt_p}{d\tau} d\tau &= \left(\frac{1}{\tau_{\Sigma}} \cdot m \cdot 0,5 \cdot \int_0^{\tau_{\Sigma}} B_g(\tau) d\tau + \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \cdot n \cdot 0,5 \cdot \int_0^{\tau_{\Sigma}} B_g(\tau) d\tau \right) \cdot \\ &\cdot (Q_{nr} - V_d \cdot C_p(t_p) \cdot t_p \cdot (1 - k_r)) - \\ &- \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \cdot \int_0^{\tau_{\Sigma}} (Q_{pot} - \alpha_{tp} \cdot F \cdot (t_p(\tau) - t_{os})) d\tau - F_m \cdot \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \cdot \int_0^{\tau_{\Sigma}} q_p d\tau; \\ \frac{T_{\Sigma}}{\tau_{\Sigma}} \cdot \int_0^{\tau_{\Sigma}} \frac{dB_d(\tau)}{d\tau} d\tau + \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \cdot \int_0^{\tau_{\Sigma}} B_d(\tau) d\tau &= \\ = \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \cdot m \cdot 0,5 \cdot \int_0^{\tau_{\Sigma}} (B_g(\tau) + B_v(\tau)) d\tau + \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \cdot n \cdot 0,5 \cdot \int_0^{\tau_{\Sigma}} (B_g(\tau) + B_v(\tau)) d\tau; \\ q_p = C_d(td_p) \cdot \frac{1}{\tau_{\Sigma}} \int_0^{\tau_{\Sigma}} \left[\frac{(td_p + (\alpha_{tp_p}/\alpha_{tp_t}) \cdot (td_p - t_m) \cdot \cos(\omega/f) + 273)^4}{100} \right. &- \\ \left. - \left(\frac{t_m + 273}{100} \right)^4 + \alpha_{tp_p} \cdot (td_p - t_m) \right] d\tau; & \\ q_p = q_t & \end{aligned} \right.$$

Применение ПРПТ предполагает соблюдение условия по сохранению скорости нагрева заготовок при сниженной температуре продуктов сгорания по сравнению с ТРПТ в камерной печи за счет поддержания равенства тепловых потоков в ПРПТ и ТРПТ.

Идентификация коэффициента конвективной теплоотдачи проведена с использованием метода наименьших квадратов.

На основе критериев подобия Нуссельта, Струхалья и Рейнольдса разработана конструкция физической модели камерной печи для исследования параметров пульсирующего режима. Экспериментальная установка состоит из рабочего пространства, группы горелок и пульсатора (рис.10, рис.11).

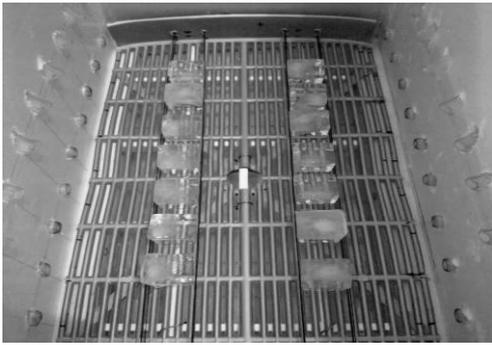


Рис.10. Рабочее пространство физической модели КП

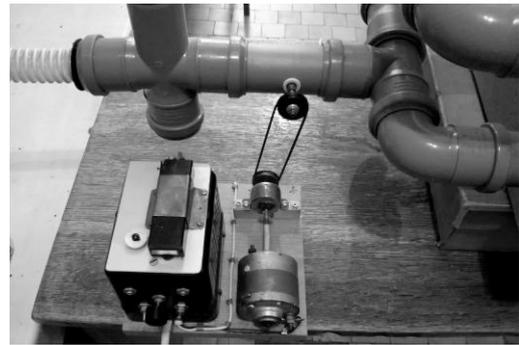


Рис.11. Конструкция пульсатора физической модели КП

Первый эксперимент проводился в ТРПТ, эксперименты в ПРПТ проводились с установленной поворотной заслонкой. Установлено сокращение времени нагрева и увеличение коэффициента конвективной теплоотдачи в диапазоне частот $1 - 1,75 \text{ Гц}$ за счет интенсификации теплообмена (рис.12 - рис.13).



Рис. 12. Время нагрева заготовок в КП при вариации частоты пульсаций



Рис. 13. Коэффициент конвективной теплоотдачи при вариации частоты пульсаций

Диапазон возможных на практике значений коэффициентов составляет $\alpha_{tp \text{ real}} = 10 \div 30 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. Повышение коэффициента конвективной теплоотдачи до $30 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ позволяет сократить расход газа до 9,6%.

Экспериментальные исследования на физической модели показали адекватность процессов в камерной печи, что позволило определить рациональный диапазон параметров в пульсирующем режиме подачи топлива. Энергосберегающий эффект достигается временем переключения горелочных устройств в диапазоне $2 \div 8,3 \text{ с}$.

При доверительном уровне вероятности 0,95 разработанная модель адекватна реальным тепловым процессам и может использоваться для синтеза САУ нагрева заготовок в ПРПТ в КП.

Третий раздел «Синтез системы автоматического управления нагревом заготовок в пульсирующем режиме подачи топлива в камерную печь» посвящен определению параметров, аналитической и функциональной структуры САУ, фильтрации информационного сигнала от помех,

обоснованию выбора типа регулятора и сравнению двух методов его настройки.

В КП для измерения доступны следующие параметры: температура дымовых газов, расход газа, расход продуктов сгорания и расход воздуха.

Оценка текущего значения нагрева металла осуществляется по косвенным данным от термопар. Для исключения различий в показаниях датчиков температур в ПРПТ в КП методом синхронного детектирования (МСД) рассчитывается усредненное значение с групп датчиков температуры:

$$\overline{t_{di}} = \frac{1}{T_{usred}} \cdot \int_0^{T_{usred}} t_{di}(\tau) d\tau, i = \overline{1,3}$$

Целью управления процессом нагрева заготовок в ПРПТ в КП является поддержание технологической карты, определяемой сортаментом стали:

$$J = \int_0^{\tau_{\Sigma}} \left| t_d^*(\tau) - \overline{t_d}(\tau) \right| d\tau \rightarrow 0$$

при выполнении ограничений:

$$\begin{cases} t_{d \min} \leq t_d \leq t_{d \max} \\ B_{g \min} \leq B_g \leq B_{g \max} \\ f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \end{cases}$$

Задача управления рассматриваемого технологического процесса решена методом упреждающей коррекции на основе разработанной прогнозирующей модели САУ, работающей в ускоренном масштабе времени. Управляющее воздействие в виде расхода теплоносителя формируется на основании предсказания траектории технологической карты нагрева. Канал управления наблюдаемый и состоит из 2-входов:

$$U^T(N) = (u_1(N), u_2(N)), U \in R_1^2, U^T(N) = (B_g, B_v),$$

где R_1^2 – область допустимых управлений; $N = \frac{\tau_{real}}{\tau_N}$ – такты управления;

τ_{real} – реальное время нагрева заготовки; τ_N – интервал дискретизации равный такту измерений возмущающего воздействия, вызванного изменением температуры нагрева воздуха.

Канал возмущения является наблюдаемым и состоит из 1-входа в период основного нагрева: $F^T(N) = f_1(N)$ и 2-входов в период выдержки:

$$F^T(N) = (f_1(N), f_2(N)), F \in R_2^2, F^T(N) = (t_v, t_{don}).$$

Выход объекта управления представлен вектором наблюдения $Y^T(N) = (y_1(N), y_2(N), y_3(N)) = (t_d, t_p, B_d)$. Контролируемые параметры, которые должны поддерживаться: $P^T(N) = (B_g / B_v, \alpha, P_g, f_p)$.

При выборе алгоритмической САУ нагрева заготовок в камерной печи учитывается специфика пульсирующей подачи топлива в КП соответствии с законом управления (рис.5):

$$B_g(\tau) = \begin{cases} B_{gI}, \tau \leq \tau_p \\ B_{gII}, \tau > \tau_p \end{cases},$$

где B_{gI}, B_{gII} – суммарное количество газа, поступающее с групп горелок; τ_p - время переключения групп горелок.

Запаздывание сигнала управления в виде расхода теплоносителя, влияет на качество переходного процесса и на безопасность в целом, в результате накопления несгоревшего газа.

Минимизация невязок по регулируемым соотношениям «газ-воздух» осуществляется при помощи синхронизирующего метода управления. Согласованная работа горелочных устройств в пульсирующем режиме обеспечивается коэффициентами согласующей матрицы (СМК) (табл.2).

Табл. 2. Согласующая матрица коэффициентов

Изменение B_g	Синхр. B_g / B_v	Снижение t_d	Синхр. B_g / B_v
$s_{11} = Bg_1 / Bd_1 = \frac{(Bg_1^* \cdot Bv_1 / Bv_1^*)}{Bg_1^* + Bv_1^*}$	$s_{12} = s_{11} \cdot k \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau_p)$	$s_{13} = z_3 \cdot s_{33}$	$s_{14} = s_{13} \cdot k \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau_p)$
Синхр. B_g / B_v	Изменение B_g	Синхр. B_g / B_v	Снижение t_d
$s_{21} = s_{22} \cdot k \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau_p)$	$s_{22} = Bg_2 / Bd_2 = \frac{Bg_2^* \cdot Bv_2 / Bv_2^*}{Bg_2^* + Bv_2^*}$	$s_{23} = s_{24} \cdot k \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau_p)$	$s_{24} = z_4 \cdot s_{44}$
Повышение t_d	Синхр. B_g / B_v	Изменение B_v	Синхр. B_g / B_v
$s_{31} = z_1 \cdot s_{11}$	$s_{32} = s_{31} \cdot k \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau_p)$	$s_{33} = Bv_1 / Bd_1 = \frac{Bv_1^* \cdot Bg_1 / Bg_1^*}{Bg_1^* + Bv_1^*}$	$s_{34} = s_{33} \cdot k \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau_p)$
Синхр. B_g / B_v	Повышение t_d	Синхр. B_g / B_v	Изменение B_v
$s_{41} = s_{42} \cdot k \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau_p)$	$s_{42} = z_2 \cdot s_{22}$	$s_{43} = s_{44} \cdot k \cdot \sin(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \tau_p)$	$s_{44} = Bv_2 / Bd_2 = \frac{Bv_2^* \cdot Bg_2 / Bg_2^*}{Bg_2^* + Bv_2^*}$

Для проведения синтеза САУ нагревом заготовок в КП получены передаточные функции по каналам управления температурой продуктов

сгорания t_d и соотношением «газ-воздух» B_g / B_v и по каналу возмущения, вызванным изменением температуры подогрева воздуха в рекуператоре t_{vp} , выбрана и обоснована структура регуляторов. Управляющие воздействия I_{RT1} , I_{RT2} , I_{RS1} , I_{RS2} с регуляторов температуры $W_{RT1}(p), W_{RT2}(p)$ и соотношения «газ-воздух» $W_{RS1}(p), W_{RS2}(p)$ поступают в согласующую матрицу коэффициентов, обеспечивающую синхронизацию подачи газо-воздушной смеси в ПРПТ на звенья W_{klg} и W_{klv} которые описывают динамические свойства клапанов (рис. 14).

Динамику процессов внешнего теплообмена описывает математическая модель, записанная в векторно-матричной форме. В разработанной структуре синтезируемой системы управления в ПРПТ в камерной печи поддержание темпа нагрева ведется по тепловому потоку в ПРПТ q_p и в ТРПТ q_t .

МСД определяется усредненное значение с группы датчиков температуры $W_{Std}(p)$ и вводится в качестве граничного условия третьего рода в программное обеспечение расчета модели внутреннего теплообмена.

Полученное значение температуры поверхности металла t_m пересчитывается блоком функции $q_p = f(t_d, t_m)$ и сравнивается с уставкой q_t для сохранения темпа нагрева заготовки в ПРПТ в камерную печь. Уставка по тепловому потоку определяется функцией $q_t = f(t_d, t_m)$ в соответствии с разработанной моделью САУ нагревом заготовок в ТРПТ в КП.

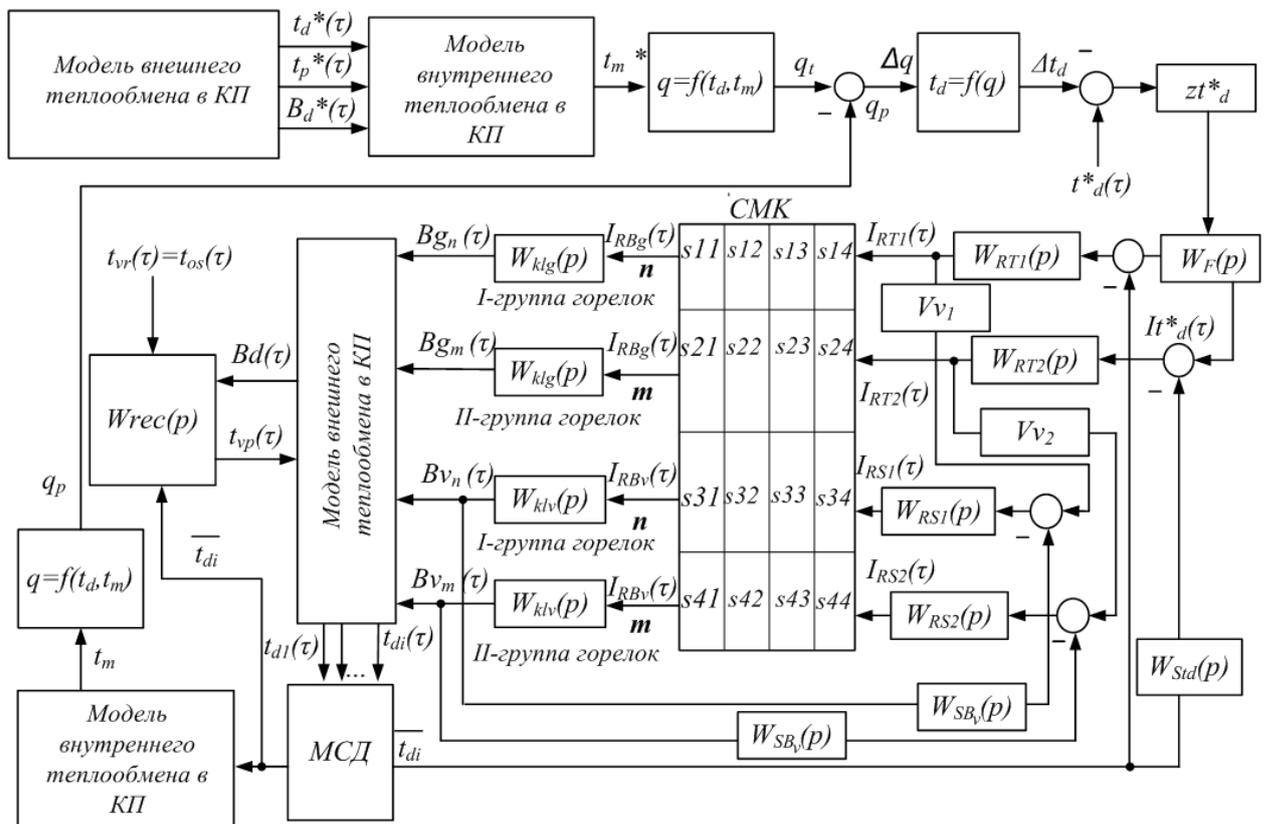


Рис. 14. Структурная схема САУ в ПРПТ в камерной печи

Для исследования динамических характеристик тепловых процессов в камерной печи и оценки показателей качества разработана блочно-ориентированная Simulink-модель системы (рис.15, рис.16).

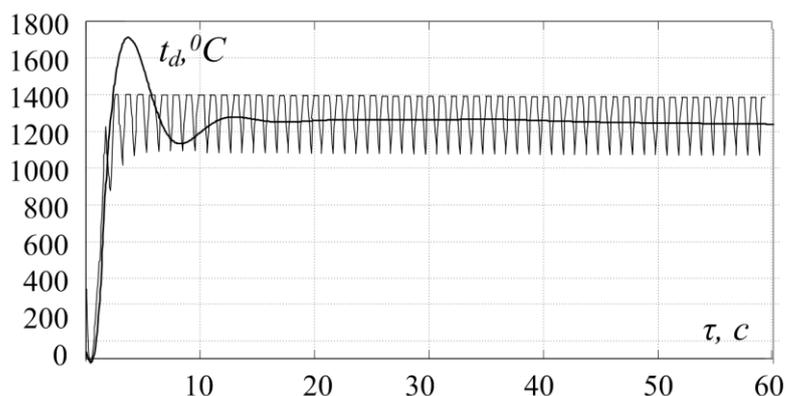


Рис.16. Переходный процесс температуры дымовых газов в ТРПТ и ПРПТ

На рисунке 17 обозначено:

$$1 - k_p = 1, k_i = 1, k_d = 1;$$

$$2 - k_p = 1, k_i = 0, k_d = 0;$$

$$3 - k_p = 5, k_i = 0, k_d = 0;$$

$$4 - k_p = 20, k_i = 0, k_d = 0;$$

$$5 - k_p = 12, k_i = 4, k_d = 9.$$

При увеличении коэффициента пропорциональности k_p

увеличивается точность,

но снижается устойчивость (рис.17, 1-3), и затем система переходит в автоколебательный режим (рис 17, 4). Определены предельные значения и получены коэффициенты настройки ПИД-регулятора методом Зиглера-

Никольса: $k_u = 20 T_u = 6 \text{ c}; k_p = k_u \cdot 0,6 = 12; k_i = \frac{2 \cdot k_p}{T_u} = 4; k_d = \frac{T_u \cdot k_p}{8} = 9.$

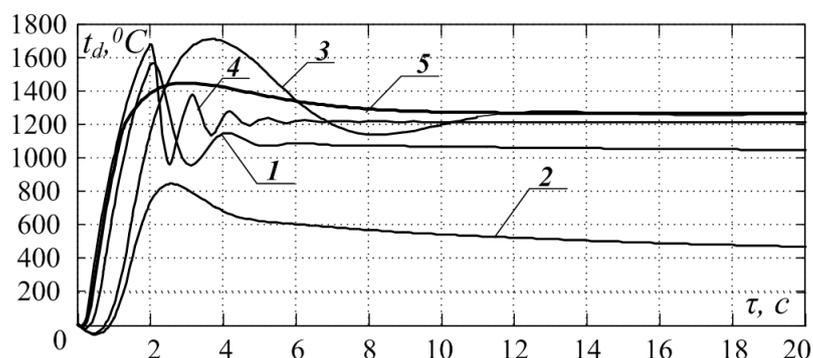


Рис.17. Переходные процессы при настройке ПИД-регулятора температуры продуктов сгорания методом Зиглера-Никольса

Переход из ОНП в ВП осуществляется изменением настроек ПИД-регулятора. При сравнении метода незатухающих колебаний с градиентным методом время переходного процесса T_{pp} сокращается на 6 с, перерегулирование σ – на 5,85 %, а максимальное динамическое отклонение Δ – на 73 °C (рис.17). Для исключения помех, которые вызваны настройкой дифференциальной составляющей ПИД-регулятора, последовательно включен сглаживающий фильтр $W_F(p)$ (рис.14). Результаты имитационного моделирования синтезированной системы с коэффициентами настроек ПИД-регулятора свидетельствуют о возможности применения САУ для управления нагревом заготовок в ПРПТ в камерную печь.

В четвертом разделе «Практическая реализация системы автоматического управления нагревом заготовок в ПРПТ в камерную печь» система управления рассматривается в виде двух уровней. Объектом контроля и управления для системы нижнего уровня является

технологическая система управления нагревом заготовок для трех камерных печей. Предложенная структура технической реализации системы управления работой КП позволяет работать в двух режимах, и производить настройку регуляторов с учетом технологических особенностей ПРПТ (рис.18).

Нижний уровень (рис. 18) включает датчики для сбора информации о протекании технологического процесса (дифманометры, термопары, термометры сопротивления), исполнительные механизмы и регулирующие органы (электромагнитные, пневматические клапаны).

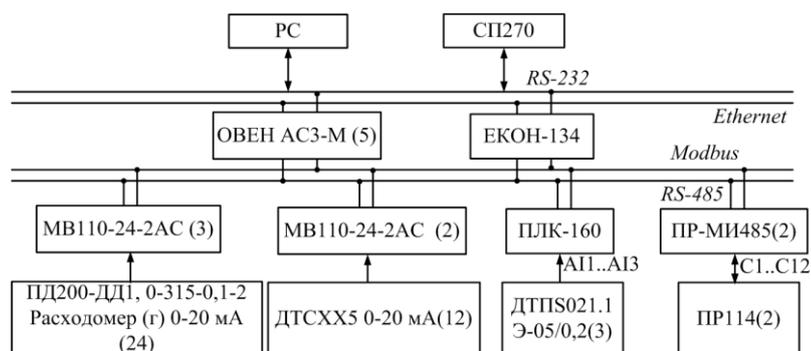


Рис. 18. Структурная схема управления нагревом заготовок в ПРПТ в камерных печах на нижнем уровне

Для скоростного ввода аналоговых сигналов (0-20 мА, 0-10 В) в сети RS-485 по протоколу Modbus с частотой измерений выборок до 200 выборок/с применен модуль *ОВЕН MB110-8АС*. Подключение к промышленной информационной сети RS-485 устройства с интерфейсом RS-232 обеспечивается адаптером интерфейсов *ОВЕН АС3-М*.

Реализация ПИД-закона регулирования осуществляется на базе программируемого логического контроллера *ОВЕН ПЛК160*. При этом формируется каскадная САУ с выходом на систему исполнительных устройств. В качестве повторителя ПЛК применено программируемое реле *ПР114*. Система управления и диспетчеризации строится с использованием интерфейса *Ethernet*, *RS-485*. Подключение *RS-485* к сети *Ethernet* обеспечивается преобразователем интерфейса *ОВЕН ЕКОН 134*. Для подключения программируемого реле к сети *RS-485*, применен интерфейсный модуль *ПР-МИ485*. Система верхнего уровня обеспечивает рациональное управление тепловыми режимами работы камерных печей.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе дано решение актуальной научно-практической задачи разработки системы автоматического управления нагревом заготовок в пульсирующем режиме подачи топлива в камерную печь, которая обеспечивает синхронную работу групп горелочных устройств, что позволяет повысить эффективность работы камерной печи путем снижения расхода газа и повышения качества нагрева заготовок.

Основные научные выводы и результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что режим подачи топлива влияет на эффективность работы камерной печи, которая определяется повышением КИТ и качеством готового продукта. Существующие средства автоматизации процесса нагрева

заготовок в КП не позволяют реализовать ПРПТ, что обусловлено отсутствием структуры, параметров и программного обеспечения системы управления в ПРПТ для камерной печи с учетом сортамента нагреваемых заготовок.

2. На основе полученных динамических уравнений процессов внешнего теплообмена в камерной печи разработана математическая модель нагрева заготовок в ПРПТ в КП, которая учитывает темп тепловой обработки при сниженной температуре продуктов сгорания в ПРПТ путем сохранения равенства поглощаемых заготовками тепловых потоков в двух режимах подачи топлива.

3. Разработана в векторно-матричной форме *Simulink*-модель расчета температурной карты с учетом теплофизических параметров материала и конструктивных особенностей КП для исследования статических и динамических характеристик по каналу управляющих воздействий.

4. Для подтверждения адекватности разработанной математической модели по критериям подобия спроектирована физическая модель камерной печи. Установлен рациональный диапазон переключения горелочных устройств для промышленной камерной печи размерами $4 \times 4 \times 15 \text{ м}^3$ составляет от 2 до 8,3 с. На физическую модель получен патент. Коэффициент конвективной теплоотдачи для сортамента заготовок устанавливается методом идентификации.

5. Разработанная структура модели САУ включает комплекс методов управления: прогностическое управление, синхронизирующее управление, автоматическую настройку ПИД-регулятора с использованием согласующей матрицы коэффициентов, что обеспечивает синхронную подачу газозвушной смеси и позволяет снизить расхода газа до 9,6%.

6. Разработана и исследована блочно-ориентированная *Simulink*-модель САУ нагревом заготовок для прогнозирования управляющих параметров в ПРПТ. Разработан файл-программа (*Script M-files*) расчета распределения температур по поверхности заготовки методом конечно-разностной аппроксимации. Граничные условия третьего рода получены путем усреднения сигналов с группы датчиков температуры методом синхронного детектирования.

7. Предложены технические решения по реализации ПРПТ на основе современной элементной базы, в соответствии с которым управляющий сигнал подается на два ПИД-регулятора температуры, и затем распределяется через программируемые реле на клапаны групп горелочных устройств для их синхронного переключения по синусоидальному закону.

8. Результаты исследований использованы при выполнении гостемы № Н 27-10 «Дослідження та удосконалення автоматизованої системи управління процесом підготовки слябів в методичній нагрівальній печі» и в учебном процессе кафедры «Горная электротехника и автоматика им.Р.М.Лейбова» ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦІИ

1. Скоробогатова И.В. Синтез системы автоматического управления энергосберегающими режимами камерной печи/И.В. Скоробогатова// Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Випуск 37/ Редкол.: Поддубняк В.Й. (голова) та ін. — Донецьк: ДонІЗТ. - 2014. – С.53-59
2. Скоробогатова И.В. Реструктуризация системы управления процессом тепловой обработки слябов в методической печи/И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. Випуск 27/ Редкол.: Поддубняк В.Й. (голова) та ін. — Донецьк: ДонІЗТ. - 2011. - С.40-44
3. Скоробогатова И.В. Пути повышения эффективности использования топлива при решении задач автоматического управления / И.В. Скоробогатова, С.В. Неежмаков, Б.В. Гавриленко// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “ Обчислювальна техніка та автоматизація ”. Випуск 183 (21)/ – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – С. 48-54
4. Скоробогатова И.В. Development model of an adaptive control system for reheating furnace/И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. Випуск 23(196)/ Редкол.: Башков Є.О. (голова) та ін. — Донецьк: ДонНТУ. - 2012. – С. 45-50
5. Скоробогатова И.В. Анализ эффективности управления термической обработкой металла в камерной печи / И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “ Обчислювальна техніка та автоматизація ”. Випуск 200 (22)/ – Донецьк: ДонНТУ. – 2012. – С.35-40
6. Скоробогатова И.В. Диагностика моментальных тепловых балансов печи для анализа эффективности теплотехнических параметров/ Б. В. Гавриленко, А. Б.Бирюков// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. Випуск / Редкол.: Башков Є.О. (голова) та ін. — Донецьк: ДонНТУ. - 2013. - С. 57-63
7. Скоробогатова І.В. Аналіз проблем побудови системи автоматичного управління тепловою роботою камерної печі/І.В. Скоробогатова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету/ТДАТУ. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – Вип.13, т.5. – С.140-144
8. Скоробогатова И.В. Экспериментальное исследование энергосберегающих режимов камерной печи/ И.В. Скоробогатова, А.Б. Бирюков, Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков, П.А.Гнителиев// Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “ Обчислювальна техніка та автоматизація ”. Випуск 2(27)/ – Донецьк: ДонНТУ. – 2014. – С.19-26
9. Скоробогатова І. В. Спосіб інтенсифікації конвективного теплообміну/ Бірюков О. Б., Гавриленко Б. В., Гнітійов П. О. //патент України на корисну

модель № 85127 от 11.11.2013 р.

10. Скоробогатова И.В. Система управления процессом нагрева слябов в печи/И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// XI міжнародна науково-технічна конференція аспірантів і студентів «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих - 2011 – Донецьк, 17--20 травня 2011- С. 193-195

11. Скоробогатова И.В. Исследование динамических характеристик системы автоматического управления температурным режимом в нагревательной печи/И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// XII международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2011 – Ухта, 16-18 марта 2011- С. 125-130

12. Скоробогатова И.В. Управление температурными режимами камерной печи/И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// XIII международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2012 – Ухта, 21-23 марта 2012- С.128-131

13. Скоробогатова И.В. Анализ проблем при построении системы автоматического управления тепловой работой камерной печи/И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// XI міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)» - Вінниця, 9-11 жовтня 2012 року. - С.189

14. Скоробогатова И.В. Технология энергосберегающего управления работой печи периодического действия с выкатным подом/ Б. В. Гавриленко, А. Б.Бирюков, П. А.Гнитиев // IV міжнародна наукова конференція «Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу» - Дніпропетровськ, 1-3 листопада, 2012 року, С. 207-210

15. Скоробогатова И.В. Специфика управления нагревом материалов в камерных печах/ Б. В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // XIII Международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических объектов. Поиск молодых» - Донецк: ДонНТУ, 14-17 мая, 2013 г. - С.179-180

16. Скоробогатова И.В. Адаптивные ПИД-регуляторы в системе управления работой камерной печи с выдвижным подом/ И.В. Скоробогатова // Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів », 17-18 жовтня 2013 р. - С.138-139

17. Скоробогатова И.В. Применение фильтра скользящего среднего при синтезе камерной печи в пульсирующем режиме/ И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// XIV Международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических объектов. Поиск молодых» - Донецк: ДонНТУ, 22-24 апреля, 2014 г. – С. 117-120

18. Скоробогатова И.В. Настройка ПИД-регулятора в САУ камерной печи/И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко// XV международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2014 – Ухта, 26-28 марта 2014.

Личный вклад соискателя в публикациях: [1,7,16] - написаны без соавтора; [2] - предложена структура САУ для печи с учетом составляющих прогнозного управления; [3] - разработана структурная схема управления тепловыми периодами печи, проанализированы параметры, влияющие на

процесс сжигания топлива; [4] - разработана математическая модель с учетом особенностей прогнозного управления, проведено компьютерное моделирование; [5] - проведен анализ эффективности сжигания газа на разработанной статической модели; [6] - разработана динамическая математическая модель внешнего теплообмена с учетом ПРПТ, проанализированы факторы, влияющие на качество нагрева заготовок при управлении; [8] - приведены результаты экспериментальных исследований в ТРПТ и ПРПТ; [9] - разработана натурная установка КП, исследованы управляющие и возмущающих воздействия в ТРПТ и ПРПТ; [10] - печь рассмотрена как объект управления, определены управляющие, возмущающие и выходные параметры, рассмотрены прогнозные модели; [11] - исследовании динамические характеристики САУ КП; [12] - проведен анализ качества заготовок на разработанной статической модели; [13] - проанализированы основные недостатки существующих систем управления нагревом заготовок; [14] - проанализирован ПРПТ, определены критериальные уравнения, необходимые для задания граничных условий при решении задачи внутреннего теплообмена; [15] - проанализированы особенности управления нагревом заготовок в КП; [17] - рассмотрена настройка ПИД-регулятора, проанализированы особенности ПРПТ, определены передаточные функции фильтра при настройке дифференциального канала; [18] - рассмотрены два метода настройки коэффициентов ПИД - регулятора в системе управления нагревом заготовок.

АННОТАЦИИ

Скоробогатова І.В. Автоматизація керування енергозберігаючими режимами камерної печі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 - «Автоматизація процесів керування». – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2014.

В дисертаційній роботі дано рішення актуальної науково-практичної задачі побудови САК нагрівом заготовок в пульсуючому режимі подачі теплоносія (ПРПТ) в камерну піч (КП), яка забезпечує синхронну роботу груп пальникових пристроїв, що дозволяє підвищити ефективність роботи камерної печі шляхом зниження витрати газу та підвищення якості нагріву заготовок.

Виведено динамічні рівняння температури і витрати продуктів згорання, температури в камерній печі.

Розроблено в векторно-матричній формі *Simulink*-модель розрахунку температурної карти з урахуванням теплофізичних параметрів матеріалу і конструктивних особливостей камерної печі.

На основі методу скінченних різниць розроблені математична модель і файл-програма вирішення задачі внутрішнього теплообміну. Граничні умови третього роду отримано шляхом усереднення сигналів з групи датчиків температури методом синхронного детектування.

Для підтвердження адекватності математичної моделі нагріву заготовок розроблено і запатентовано фізичну модель камерної печі.

Встановлено раціональний діапазон перемикання пальників в ПРПТ в камерну піч.

Отримано передавальні функції по каналу регулювання температури продуктів згорання, повітря після рекуператора і співвідношення «газ-повітря».

Використаний метод синхронізуючого керування для синтезу САК в ПРПТ в КП, заснований на визначенні узгоджуючої матриці коефіцієнтів для підтримки регульованих співвідношень «газ-повітря».

Розроблено і досліджено блочно-орієнтовану *Simulink*-модель САК нагрівом заготовок для прогнозування керуючих параметрів в ПРПТ.

Запропоновано структура і комплекс технічних засобів реалізації САК в ПРПТ в КП.

Ключові слова: камерна піч, пульсуючий режим, динамічні рівняння, математична модель, система автоматичного керування, синтез.

Скоробогатова И.В. Автоматизация управления энергосберегающими режимами камерной печи. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - «Автоматизация процессов управления». - ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2014.

В диссертационной работе дано решение актуальной научно-практической задачи построения САУ нагревом заготовок в пульсирующем режиме подачи теплоносителя (ПРПТ) в камерную печь (КП), которая обеспечивает синхронную работу групп горелочных устройств, что позволяет повысить эффективность работы камерной печи путем снижения расхода газа и повышения качества нагрева заготовок.

Выведены динамические уравнения температуры и расхода продуктов сгорания, температуры в камерной печи.

Разработана в векторно-матричной форме *Simulink*-модель расчета температурной карты с учетом теплофизических параметров материала и конструктивных особенностей камерной печи.

На основе метода конечных разностей разработаны математическая модель и файл-программа решения задачи внутреннего теплообмена. Граничные условия третьего рода получены путем усреднения сигналов с группы датчиков температуры методом синхронного детектирования.

Для подтверждения адекватности математической модели нагрева заготовок разработана и запатентована физическая модель камерной печи.

Установлен рациональный диапазон переключения горелок в ПРПТ в камерную печь.

Получены передаточные функции по каналу регулирования температуры продуктов сгорания, воздуха после рекуператора и соотношения «газ-воздух».

Использован метод синхронизирующего управления для синтеза САУ в ПРПТ в КП, основанный на определении согласующей матрицы коэффициентов для поддержания регулируемых соотношений «газ-воздух».

Разработана и исследована блочно-ориентированная *Simulink*-модель САУ нагретом заготовок для прогнозирования управляющих параметров в ПРПТ.

Предложены структура и комплекс технических средств реализации САУ в ПРПТ в КП.

Ключевые слова: камерная печь, пульсирующий режим, динамические уравнения, математическая модель, система автоматического управления, синтез.

Skorobogatova I.V. Automation of control energy-saving modes of chamber furnace. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree speciality 05.13.07 - «Control processes of automation». State high educational institution «Donetsk National Technical University», Donetsk, 2014.

PhD thesis a solution is given important scientific and practical task of building ACS heating billets in pulsing mode flow of coolant (PMFC) into the chamber furnace (CF), which provides synchronous operation of groups of burners that can increase the efficiency of the furnace chamber by reducing the gas consumption and improve quality heating of billets.

Dynamic equations temperature and flow rate of the combustion products, the temperature in the chamber furnace are derived.

In vector-matrix form *Simulink*-model for calculating the temperature card taking into account the thermal parameters of the material and the design features of the chamber furnace is developed.

On the basis of the finite difference method mathematical model and file program for solving the problem of the internal heat transfer is developed. The boundary conditions third types are obtained by averaging the signals from the temperature sensors group by synchronous detection.

To confirm the adequacy of the mathematical model of heating billets a physical model of the chamber furnace is developed and patented.

Rational switching range burners into PMFC the chamber furnace was set.

The transfer functions via the temperature control of the combustion products, the air after the heat exchanger and the ratio «gas-air» are obtained.

The method of synchronizing control for the synthesis of ACS in PMFC in KP, based on the definition of the matching of the coefficient matrix to maintain the regulated ratio «gas-air».

A block-oriented *Simulink*-model ACS heating billets for prediction control parameters in PMFC is developed and investigated.

Structure and a set of technical means to implement the ACS in PMFC in CF are proposed.

Keywords: chamber furnace, pulsed mode, the dynamic equations, mathematical model, automatic control system, synthesis.

Підп. до друку 14.10.2014 Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman
Друк Rizo. Ум. друк. арк.: 0,9. Обл. вид. арк.: 1,0
Тираж 100 прим.

Надруковано: РВВ Видавництво “Донецька політехніка”
83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58. Тел.: (062) 301-09-67