

УДК 681.513.7

**И.В. Скоробогатова¹, А.Б. Бирюков (канд. техн. наук, доц.)²,
Б.В. Гавриленко (канд. техн. наук, доц.)¹**

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

1) кафедра «Горная электротехника и автоматика им. Р.М.Лейбова»

2) кафедра «Техническая теплофизика»

E-mail: kitagea@rambler.ru

ДИАГНОСТИКА МОМЕНТАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ БАЛАНСОВ ПЕЧИ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Проведен анализ теплотехнических параметров, влияющих на качество нагрева заготовок в камерной печи. Получены динамические уравнения в периоды основного нагрева и выдержки металла в печи.

Ключевые слова: топливо, датчики, режим, управление, печь, диагностика, эффективность.

Общая постановка проблемы

Для реализации автоматического управления процессом нагрева заготовок металла используются АСУ ТП, основной особенностью которых является возможность диагностики тепловой работы печи. Обычно нагрев металла ведут по температуре продуктов сгорания.

При тепловой обработке заготовок в камерных печах идеальной величиной для реализации диагностики является температура поверхности нагреваемого материала. Использование анализа изменения этой величины в качестве основы проведения диагностики имеет ряд преимуществ, так как в конечном итоге нормируемым показателем качества нагрева является тепловое состояние нагреваемых тел [1].

Также при определенном подходе к установке датчиков есть возможность исследования несимметричности теплообмена внутри камеры печи. Следует отметить, что измерение температуры поверхности нагреваемых тел в камере печи при помощи пирометров, представляет собой достаточно трудоемкую техническую задачу.

Постановка задачи исследования

Известна система регулирования теплового режима нагревательных печей периодического действия, содержащая датчик температуры, регуляторы температуры и соотношения расходов топлива и воздуха и исполнительные механизмы подачи топлива и воздуха [2]. Недостатком известной системы автоматического управления является отсутствие текущей информации о фактическом нагреве металла, то есть тепловом потоке, поглощаемым металлом, что может приводить к перерасходу природного газа.

В литературе отсутствует строгое научное описание процессов, имеющих место при импульсном отоплении. Экономия топлива от реализации этой технологии, согласно разным источникам достигает 10-15% [3].

Фактор усиления конвективной составляющей теплообмена, зафиксированный в экспериментах, подтверждает, что рационально управление следует вести по закону изменения усваиваемого теплового потока заготовкой $q(\tau)$, а не по температуре продуктов сгорания $td(\tau)$, как принято в традиционной технологии нагрева металла в печах.

Целью данной работы является создание методики для косвенного определения величин тепловых потоков, усваиваемых поверхностью металла.

Решение задачи и результаты исследования

В камерной печи нагрев заготовок осуществляется по режимным температурным картам, которые предусматривают интенсивный нагрев и выдержку заготовок в печи [4]. Следовательно, проведем декомпозицию камерной печи с учетом процессов в рекуператоре на периоды основного нагрева и выдержки заготовок [5]. Управляющими воздействиями являются расход газа B_g , расход воздуха B_v , управляемыми – температура продуктов горения t_d , температура поверхности металла t_{pm} ; контролируемые – расход продуктов горения в период выдержки B_d , температура воздуха t_{vp} ; возмущающими – температура окружающего воздуха t_{os} . Статическая характеристика температуры дымовых газов в период основного нагрева заготовок имеет вид:

$$t_d = \frac{Bg \cdot Qnr - q \cdot Fm - \alpha \cdot F \cdot (td - t_{os}) - Qpot}{Bg \cdot Vd \cdot Cd^{td} \cdot (1 - k_r)}$$

Найдем динамические характеристики в период основного нагрева заготовок:

– температура дымовых газов, заполняющих камеру печи:

$$V_{kam} \cdot Cd^{td} \cdot \frac{dt_d}{d\tau_n} = Bg(\tau_n) \cdot Qnr - Bg(\tau_n) \cdot Vd \cdot Cd^{td} \cdot td(\tau_n) \cdot (1 - k_r) - q(\tau_n) \cdot Fm - \alpha \cdot F \cdot (td(\tau_n) - t_{os}) - Qpot(\tau_n); \quad (1)$$

– расход продуктов сжигания топлива в период нагрева заготовок:

$$Tn \cdot \frac{dB_d(\tau_n)}{d\tau_n} + B_d(\tau_n) = Bg(\tau_n) + Bv(\tau_n);$$

– температура кладки в период нагрева заготовок:

$$M_{kl} \cdot C_{kl}^{t_{kl}} \cdot \frac{dt_{kl}}{d\tau_n} = \alpha \cdot F \cdot [t_d(\tau_n) - t_{kl}(\tau_n)].$$

Уравнение статической характеристики температуры дымовых газов в период выдержки заготовок металла:

$$t_d = \frac{Bg \cdot Qnr - q \cdot Fm - \alpha \cdot F \cdot (td - t_{os}) - Qpot}{Bg \cdot Vd \cdot Cd^{td} \cdot (1 - k_r)}$$

Найдем динамические характеристики в период выдержки:

– температура дымовых газов, заполняющих камеру печи:

$$V_{kam} \cdot Cd^{td} \cdot \frac{dt_d}{d\tau_v} = Bd(\tau_n) \cdot Cd^{td} \cdot td(\tau_n) + Bg(\tau_v) \cdot Qnr - Qpot(\tau_v) - Bg(\tau_v) \cdot Vd \cdot Cd^{td} \cdot td(\tau_v) \cdot (1 - k_r) - q(\tau) \cdot Fm - \alpha \cdot F \cdot (td(\tau_v) - t_{os}); \quad (2)$$

– расход продуктов сжигания топлива в период выдержки заготовок:

$$Tv \cdot \frac{dB_d(\tau_v)}{d\tau_v} + B_d(\tau_v) - B_d(\tau_n) = Bg(\tau_v) + Bv(\tau_v);$$

– температура кладки в период выдержки заготовок:

$$M_{kl} \cdot C_{kl}^{t_{kl}} \cdot \frac{dt_{kl}}{d\tau_v} = \alpha \cdot F \cdot [t_d(\tau_v) - t_{kl}(\tau_v)].$$

Найдем динамические характеристики нагрева воздуха в рекуператоре в период основного нагрева и выдержки заготовок соответственно:

$$B_{vr}(\tau_n) + B_{vr}(\tau_v) = B_{vp}(\tau_n) + B_{vp}(\tau_v),$$

$$B_{dp}(\tau_n) = B_{dr}(\tau_n),$$

$$\begin{aligned} & \frac{dB_{dp}}{d\tau_n} \cdot C^{t_{dp}} \cdot [t_{dp}(\tau_n) - t_{dr}(\tau_n)] + B_{dp} \cdot C^{t_{dp}} \cdot [t_{dp}(\tau_n) - t_{dr}(\tau_n)] = \\ & = \frac{dB_{vr}}{d\tau_v} \cdot C^{t_{vr}} \cdot [t_{vr}(\tau_n) - t_{vp}(\tau_n)] + B_{vr} \cdot C^{t_{vr}} \cdot [t_{vr}(\tau_n) - t_{vp}(\tau_n)], \end{aligned}$$

$$B_d^p(\tau_v) = B_d^r(\tau_v),$$

$$\begin{aligned} & \frac{dB_{dp}}{d\tau_v} \cdot C^{t_{dp}} \cdot [t_{dp}(\tau_v) - t_{dr}(\tau_v)] + B_{dp} \cdot C^{t_{dp}} \cdot [t_{dp}(\tau_v) - t_{dr}(\tau_v)] = \\ & = \frac{dB_{vr}}{d\tau_v} \cdot C^{t_{vr}} \cdot [t_{vr}(\tau_v) - t_{vp}(\tau_v)] + B_{vr} \cdot C^{t_{vr}} \cdot [t_{vr}(\tau_v) - t_{vp}(\tau_v)]. \end{aligned}$$

Сущность подхода заключается в том, что из выражения (1) определяется значение средней плотности теплового потока, падающего на поверхность материала в течение короткого, но конечного периода времени основного нагрева $\Delta\tau_n$ [1]:

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \frac{\overline{Bg} \cdot Q_{nr} \cdot \Delta\tau_n - \overline{Qpot} \cdot \Delta\tau_n - \alpha \cdot F \cdot (\overline{td} - \overline{t_{os}}) \cdot \Delta\tau_n -}{Fm \cdot \Delta\tau_n} \\ & - \frac{\overline{Bg} \cdot Vd \cdot Cd \cdot \overline{td} \cdot (1 - \overline{k_r}) \cdot \Delta\tau_n - V_{kam} \cdot Cd \cdot \Delta\tau_n}{Fm \cdot \Delta\tau_n}. \end{aligned} \tag{3}$$

Соответственно для периода выдержки из выражения (2), получим:

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \frac{\overline{Bd} \cdot Cd \cdot \overline{td} \cdot \Delta\tau_n + \overline{Bg} \cdot Q_{nr} \cdot \Delta\tau_v - \overline{Qpot} \cdot \Delta\tau_v - \alpha \cdot F \cdot (\overline{td} - \overline{t_{os}}) \cdot \Delta\tau_v -}{Fm \cdot \Delta\tau} \\ & - \frac{\overline{Bg} \cdot Vd \cdot Cd \cdot \overline{td} \cdot (1 - \overline{kr}) \cdot \Delta\tau_v - V_{kam} \cdot Cd \cdot \Delta\tau}{Fm \cdot \Delta\tau_v}, \end{aligned} \tag{4}$$

где $\Delta\bar{t}$ – изменение средней температуры продуктов сгорания в период выдержки, заполняющих камеру печи, °С.

Все величины в выражениях (1) и (2) имеют такое же значение, как и в зависимости (3) и (4) соответственно. знак усреднения над ними говорит о том, что берется среднее значение величин за период времени $d\tau$.

Величина тепловых потерь камеры печи Q_{pot} рассчитывается математическим моделированием на основании заданных параметров технологии с учетом измеренных значений td и $\Delta\bar{t}$. В случае достаточно равномерного температурного поля в рабочем пространстве камерной печи возможно уменьшение числа датчиков. Их минимальное количество – один датчик в районе рабочего окна, через которое продукты сгорания покидают камеру печи. В этом случае принимаем $td = \Delta\bar{t}$.

Среднее значение коэффициента рекуперации за период времени Δt в период нагрева и период выдержки соответственно, определяется:

$$kr = \frac{\overline{Vv} \cdot Cv^{tv} \cdot \overline{\Delta tv}}{\overline{Bg} \cdot Vd \cdot Cd^{td} \cdot \overline{td}},$$

где $\overline{\Delta tv}$ – среднее повышение температуры воздуха в результате нагрева в рекуператоре за период времени Δt в период основного нагрева, °С.

Величина $\overline{\Delta tv}$ определяется в результате замеров температуры холодного воздуха и его температуры в раздающем коробе перед горелками.

Итоговый коэффициент теплоотдачи к поверхности нагреваемого материала [1]:

$$\overline{\alpha}_{\Sigma} = \frac{\overline{q}}{t_d - t_{pm}},$$

где $\overline{t_{pm}}$ – средняя температура поверхности нагреваемого материала, в течение рассматриваемого периода времени dt .

Наличие этого комплекса информации позволяет также определять текущие значения коэффициента использования топлива и коэффициента полезного действия камерной печи.

Предложенный подход содержит в себе возможность экспериментальной проверки влияния различных параметров технологии на эффективность нагрева металла. Увеличение значения КИТ и сокращения расхода газа может достигаться при снижении температуры дымовых газов [6]. На практике при решении задач энергосбережения имеется ограничение по скорости нагрева. Следовательно, для сохранения темпа нагрева при снижении температуры дымовых газов необходимо, чтобы итоговая плотность теплового потока, падающего на поверхность металла, для обыкновенного и предлагаемого режима были равны [1].

Поставленная задача может быть решена за счет повышения коэффициента конвективной теплоотдачи или коэффициента излучения. В результате проведения экспериментальных исследований на созданной натурной модели камерной печи, было установлено, что применение импульсного режима позволит повысить коэффициент теплоотдачи на 30-35% и сократить время нагрева на 15-20 %.

В основе реализации этой концепции лежит создание эталонной диаграммы конкретных операций тепловой обработки садки материала с заданными параметрами в конкретной печи. Таким образом, для текущего значения температуры поверхности металла, состава дымовых газов, геометрических характеристик камеры печи, значения коэффициента конвективной теплоотдачи необходимо определить при какой температуре достигается заданная плотность теплового потока, которая формируется по механизмам лучистой и конвективной теплопередачи.

С учетом этих особенностей разработана структурная схема модели тепловой работы печи в периоды основного нагрева (рис. 1) и выдержки заготовок (рис.2), а также структурная схема системы управления нагревом заготовок в камерных печах (рис. 3).

Одним из перспективных способов повышения оперативного прогноза качества нагрева заготовок в камерной печи является применение нейросетевого моделирования. Обученные нейронные сети дают возможность управлять температурными и тепловыми режимами камерной печи, что позволит повысить КИТ.

Анализ показал, что качество управления объектов управления повышается в случае применения нейросетевых систем автоматического управления (НСАУ).

Целью НСАУ является определение закона регулирования расхода теплоносителя в зависимости от вида теплового режима в процессе обучения и протекания технологического процесса нагрева металла в печи в целом.

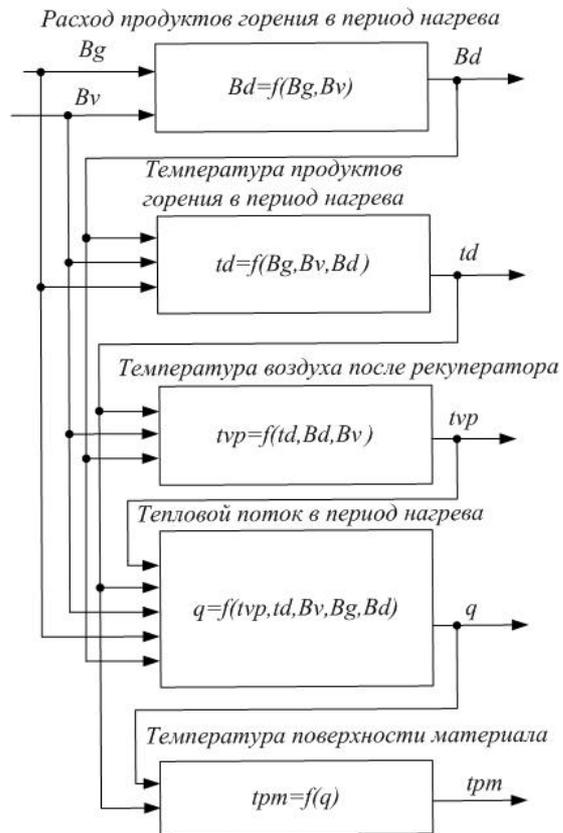


Рисунок 1 - Структурная схема модели тепловой работы печи в период основного нагрева заготовок

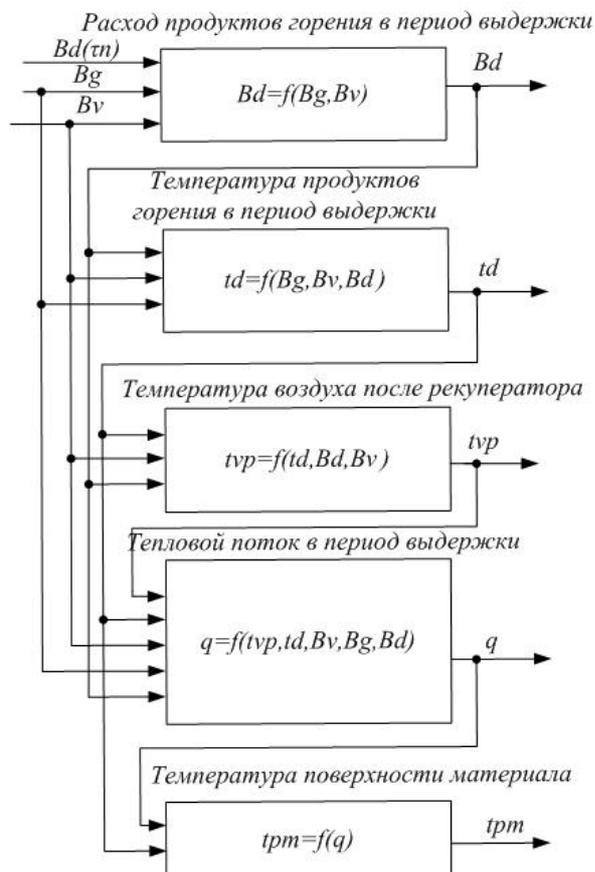


Рисунок 2 – Структурная схема модели в период выдержки заготовок в камерной печи

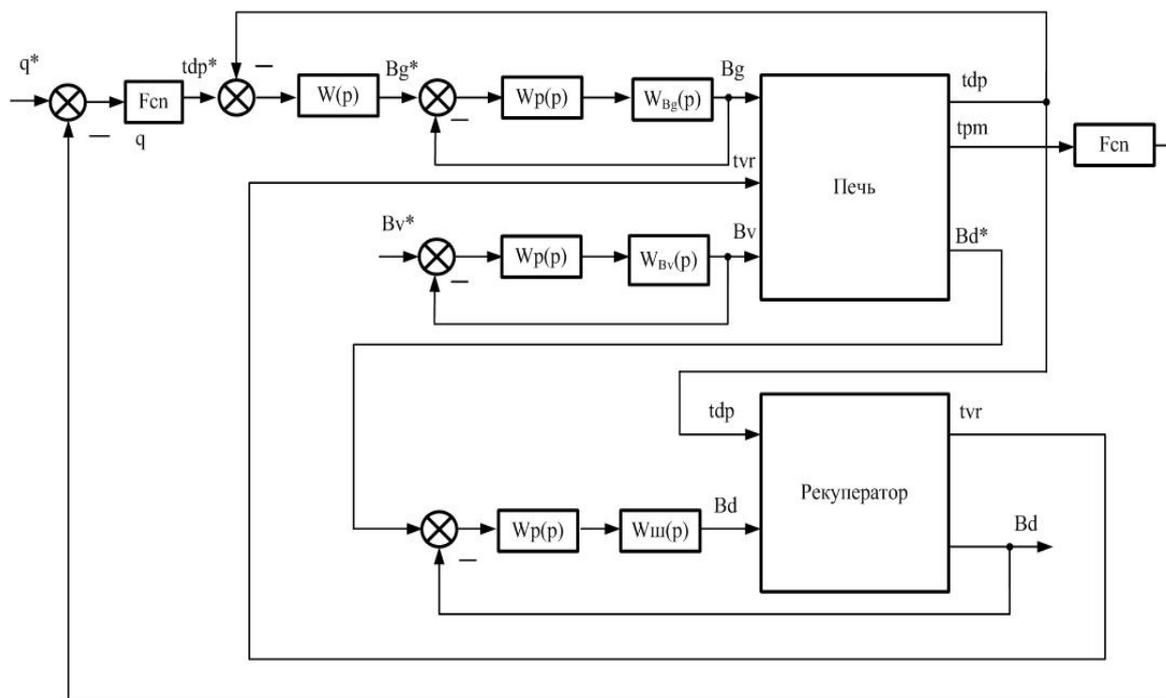


Рисунок 3 – Структурная схема системы управления нагревом заготовок в камерных печах

Выводы

Для достижения заданного теплового потока, усваиваемого материалом заготовки, при различных коэффициентах конвективной теплоотдачи требуются различные температуры дымовых газов. Следовательно, управление следует вести по закону $q(\tau)$, используя методику диагностирования моментальных тепловых балансов для камерной печи.

Реализация требований по энергосберегающей технологии для повышения эффективности использования топлива требует изменения количества операций при автоматизации камерной печи, а значит изменение функциональных возможностей разрабатываемой системы. Это, в свою очередь, усложняет принципиальную схему отдельных блоков, и приводит к использованию дополнительных звеньев и контуров регулирования.

Комплексное решение проблемы эффективного использования топлива лежит во внедрении принципиально новых средств управления, которые будут управлять рядом новых технологических операций в условиях применения энергосберегающей технологии.

Список использованной литературы

1. Бирюков А.Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: монография / А. Б. Бирюков. – Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2012. - 248 с.
2. Система автоматического регулирования теплового режима нагревающей печи: А.с. СССР 1723157 МПК С21D11/00. - опубл. 30.03.92, БИ №12.
3. Evaluation of thermal characteristics of oscillating combustion // International Journal of Engineering, Science and Technology. - 2010. - Vol. 2, No. 2. – PP. 165-173.
4. 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". – 2012. - Випуск 22(200). – 35-40 с.

5. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман; пер с англ. И. М. Макарова. – М.: Мир, 1984. – 541 с., ил.
6. Скоробогатова И.В. Пути повышения эффективности использования топлива при решении задач автоматического управления / И.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – 2011. – Випуск 21(183). – 48-54 с.

Надійшла до редакції:
30.04.2013

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Чичикало Н.І.

І.В. Скоробогатова, О.Б. Бірюков, Б.В. Гавриленко

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Діагностика моментальних теплових балансів печі для аналізу ефективності теплотехнічних параметрів. Проведено аналіз теплотехнічних параметрів, які впливають на якість нагріву заготовок в камерній печі. Отримано динамічні рівняння в періоді основного нагріву і витримки металу в печі.

Ключові слова: паливо, датчики, режим, управління, піч, діагностика, ефективність.

I. Skorobogatova, A. Biryukov, B. Gavrylenko

Donetsk National Technical University

Diagnosis of Instant Heat Balances for the Analysis of the Furnace Thermal Parameters Efficiency. We analyze thermal parameters that affect the quality of billet heating in the chamber furnace. Dynamic equations were obtained during primary heating and during exposure of metal in the furnace. In the heat treatment chamber furnaces blanks controlled variable to implement diagnostics is the surface temperature of the material. It was determined that the normalized measure of the quality of the heating is heated by the thermal state of the billet. At a certain approach to the installation of the sensors is possible to study the asymmetry of heat within the furnace. Measure the surface temperature of heated bodies in the furnace chamber pyrometers is a daunting technical challenge. A disadvantage of the known system of automatic control is the absence of current information about the actual heating of the metal. The use of a heat meter in the automatic control system will evaluate the current heat absorption of the metal and keep heating for a given temperature regime map. Increasing the value of the fuel utilization factor and reduce gas consumption can be achieved by lowering the temperature of flue gases. The problem can be solved by increasing the convective heat transfer coefficient or emissivity. It has been studied experimentally. It has been found that the use of pulsed mode will increase the heat transfer coefficient by 30-35% and to reduce the heating time by 15-20%. The implementation of the requirements of energy-saving technology to increase fuel efficiency requires a change in the number of operations in the automation of the furnace, and thus changes the functionality of the system being developed. This in turn complicates the concept of separate blocks and links and the use of additional control circuits. Enhanced functionality, improving performance of the furnace requires a change in the structure of the automation system thermal furnace.

Keywords: fuel, sensors, position, control, furnace, diagnostics, efficiency.