

УДК 62-932.2

**И.В. Скоробогатова, С.В. Неежмаков, Б.В. Гавриленко**  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра горной электротехники и автоматики  
E-mail: [kitagea@rambler.ru](mailto:kitagea@rambler.ru)

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОПЛИВА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

### *Аннотация*

*Скоробогатова И.В., Неежмаков С.В., Гавриленко Б.В. Пути повышения эффективности использования топлива при решении задач автоматического управления. Проанализировано влияние факторов на установление заданного температурного режима в методической нагревательной печи (МНП). Обоснована необходимость реструктуризации действующей системы автоматического управления температурным режимом в томильной зоне МНП и повышение качества нагрева металла за счет полного сгорания топлива.*

*Ключевые слова:* методическая нагревательная печь, коэффициент использования топлива, тепло, модель, качество, стабилизация.

### **Общая постановка проблемы.**

В условиях значительного колебания стоимости энергоносителей, повышения требований к экологической безопасности производства и качеству выпускаемой продукции, работа металлургического комплекса основывается на внедрении новых технологий и получении энергетического эффекта от использования этих технологий.

Для нагрева заготовок перед прокаткой на листовых прокатных станах применяют методические нагревательные печи (МНП). Непрерывный характер работы печи и наличие зон нагрева и выдержки позволяют получить гибкое изменение температурного режима для подготовки сляба перед прокаткой [6].

Некорректно выбранный температурный режим в зонах МНП характеризуется неодинаковым теплосодержанием по сечению заготовки, и при обработке давлением на прокатном стане приводит к вытягиванию участков материала сляба по длине заготовки, а по ширине – к скручиванию, при этом имеет место деформация металла. Вследствие этого обрабатываемое изделие не обладает качественными характеристиками, отмеченными в технологической карте процесса нагрева заготовок металла [8].

### **Постановка задачи исследования.**

Для каждой марки стали имеется максимально допустимое значение температуры, исключающее перегрев. Легированные стали и стали с повышенным содержанием углерода, кремния и хрома чувствительны к большим перепадам температуры, так как прокатываются с большим сопротивлением деформации [3].

Одним из требований, предъявляемых к нагреву металла, является равномерность распределения температуры по сечению заготовки [4]. Равномерность нагрева обеспечивают выдержкой металла в томильной зоне МНП. Длительная выдержка при температуре металла более  $800^{\circ}\text{C}$  ведет к образованию окалины и обезуглероживанию [10]. Перепад температур по сечению сляба колеблется по заводским данным от  $100^{\circ}\text{C}$  до  $300^{\circ}\text{C}$ . Выбор конечной разности температур заготовки зависит от инерционного периода, в течение которого градиент температуры растет внутри заготовки [10].

Стабилизация температурного режима в МНП является обязательным условием получения качественной продукции и повышения эффективности использования топлива [1].

Таким образом, необходимо рассмотреть все факторы, влияющие на эффективность использования энергоносителя.

**Решение задачи и результаты исследования.**

Управление процессом нагрева заготовки металла в методической нагревательной печи (МНП) состоит в выборе параметров и обеспечении определенного режима работы печи, необходимого для получения сляба заданного качества с минимальным удельным расходом топлива при работе агрегата с максимальной производительностью [5].

Структурная схема управления тепловой нагрузкой МНП приведена на рисунке 1.

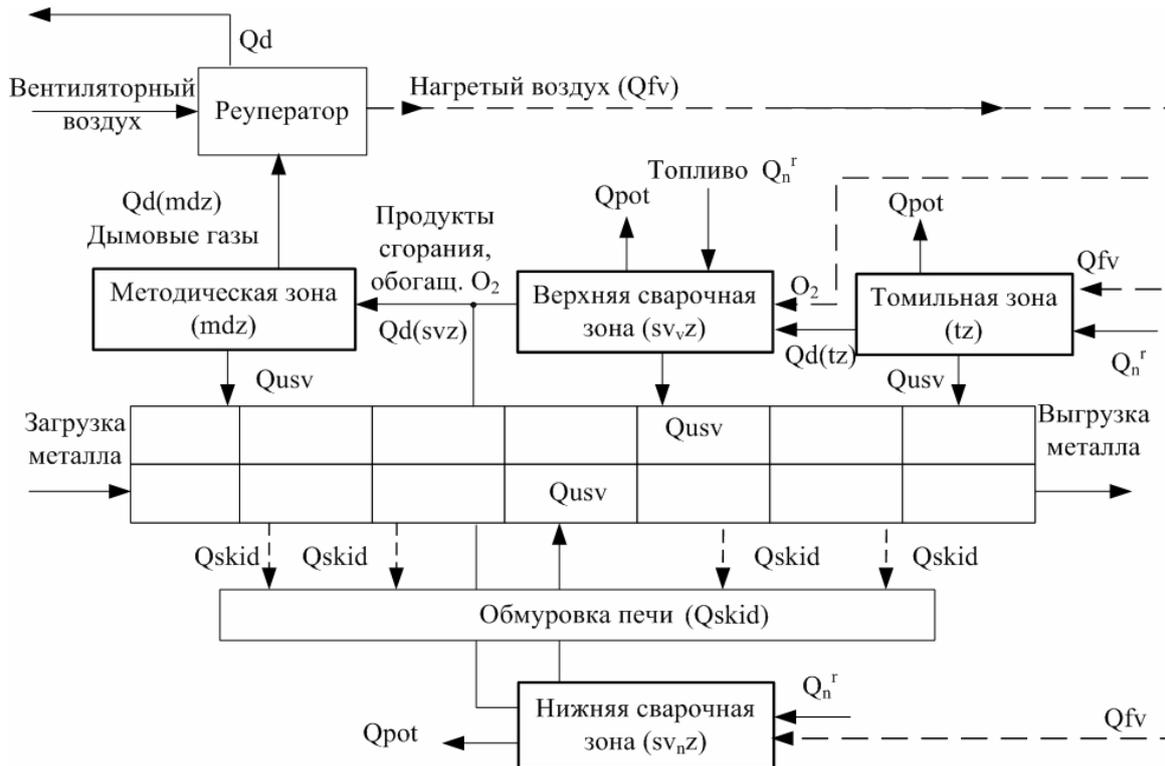


Рисунок 1 – Структурная схема управления тепловой нагрузкой МНП

Уравнения теплового баланса нагрева сляба и подогрева воздуха в рекуператоре, описывающие процессы в МНП имеют вид в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1:

$$\begin{cases} Q_n^r + \alpha \cdot V_\alpha \cdot [I(T_{v2}) - I(T_{v1})] = M \cdot \frac{d I_{usv}(Ts)}{d\tau} + V_d \cdot [I(T_{d1}) - I(T_{d2})] \\ V_\alpha \cdot [I_{v2}(T_{v2}) - I_{v1}(T_{v1})] = V_d \cdot [I(T_{d1}) - I(T_{d2})] \cdot \eta_{pot} \end{cases}, (1)$$

где  $I$  – удельная энтальпия, кДж/м<sup>3</sup>;  $I = f(T)$  – при моделировании задается массивом данных;  $Q_n^r$  – теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $V_\alpha$  – действительный расход воздуха, подаваемый в МНП для сжигания единицы топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $V_d$  – объем дымовых газов, образующихся при сжигании единицы топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $T_{v1}, T_{v2}$  – температура воздуха до и после рекуператора, °C;  $T_{d1}, T_{d2}$  – температура дымовых газов до и после рекуператора, °C;  $T_s$  – температура стали, °C;  $\eta_{pot}$  – коэффициент потерь теплоты в окружающую среду.

Основным параметром, который определяет экономичность работы нагревательной печи, является коэффициент использования топлива (КИТ)  $\eta_{kit}$  :

$$\eta_{kit} = \frac{Q_n^r + Q_{fv} - Q_d - Q_n}{Q_n^r} = \frac{Q_n^r - Q_d \cdot (1 - \eta_{rec}) - Q_n}{Q_n^r} \quad (2)$$

где  $Q_{fv}$  – количество тепла, вносимое в печь с подогретым воздухом на единицу топлива при его нагреве за счет тепла уходящих газов, кДж/м<sup>3</sup>;  $Q_n$  - потери тепла от недожога топлива, отнесенные к единице топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $Q_d$  - потери тепла с физическим теплом уходящих газов, отнесенные к единице топлива, кДж/м<sup>3</sup>;  $\eta_{rec}$  - коэффициент рекуперации.

Основными факторами, влияющими на эффективность использования топлива МНП в соответствии с выражением (2) являются: теплота сгорания топлива  $Q_n^r$ ; температура уходящих газов  $T_{d2}$ ; температура нагрева воздуха  $T_{v2}$ ; коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  и обогащение дутья кислородом. Выбор способа сжигания топлива и конструкции горелок обуславливается необходимостью обеспечения заданного теплового напряжения рабочего пространства МНП [6].

При анализе (2) установлено: при  $Q_n^r = 17$  МДж (коксовый газ) увеличение  $T_{d2}$  с 800 °С до 1000 °С снижает значение  $\eta_{kit}$  с 0,67 до 0,56. С повышением  $Q_n^r = 33$  МДж (природный газ) в том же температурном диапазоне КИТ будет лежать в пределах от 0,74 до 0,7 [10].

Температура нагрева воздуха в рекуператоре, как правило, составляет 200 – 400°С, при  $Q_n^r = 33$  МДж КИТ будет соответственно колебаться в диапазоне  $\eta_{kit} = 0,76..0,87$ , для коксового газа с  $Q_n^r = 17$  МДж значение КИТ составит  $\eta_{kit} = 0,73..0,81$ . Следовательно, влияние подогрева воздуха на КИТ почти одинаково для топлива с разной теплотой сгорания. Поддержание оптимального соотношения  $T_{v2}$  и  $T_{d2}$  в соответствии с уравнением теплового баланса рекуператора (1) позволит повысить  $Q_{fv}$ , которое в свою очередь приводит к повышению КИТ, то есть частично заменяет тепло от сжигания газа.

В настоящее время на металлургических заводах используется способ прямого нагрева, основанный на сжигании топливовоздушной смеси с избытком воздуха  $\alpha > 1$ . При этом соотношение «топливо-воздух» составляет 1:10. Недостатком способа является потеря на угар, вследствие поддержания окислительной атмосферы в МНП [12]. При коэффициенте избытка воздуха  $\alpha > \alpha_{optim}$  возрастают потери тепла с уходящими газами  $Q_d$ , что приводит к снижению температуры в рабочем пространстве печи и этим обуславливает неполное сгорание топлива [7]. При безокислительном нагреве  $\alpha < 1$  уменьшается угар металла, однако недостатком этого способа является неполное сгорание топлива и превышение в продуктах сгорания содержания угарного газа  $V_{CO}$  [3]. Организация полного сжигания топлива при оптимальном коэффициенте расхода воздуха  $\alpha$  в томительной зоне и сварочных зонах МНП приводит к повышению КИТ за счет уменьшения потерь от химического недожога топлива  $Q_n$ . При обогащении воздуха кислородом увеличивается количество воздуха, подаваемого в МНП в единицу времени. На каждый 1 м<sup>3</sup> вдуваемого природного газа повышают расход кислорода на 1,6 – 2,0 м<sup>3</sup>, при этом расход воздуха уменьшается на 1,5-1,8%. С повышением содержания  $O_2$  в воздухе увеличивается количество сжигаемого газа [3].

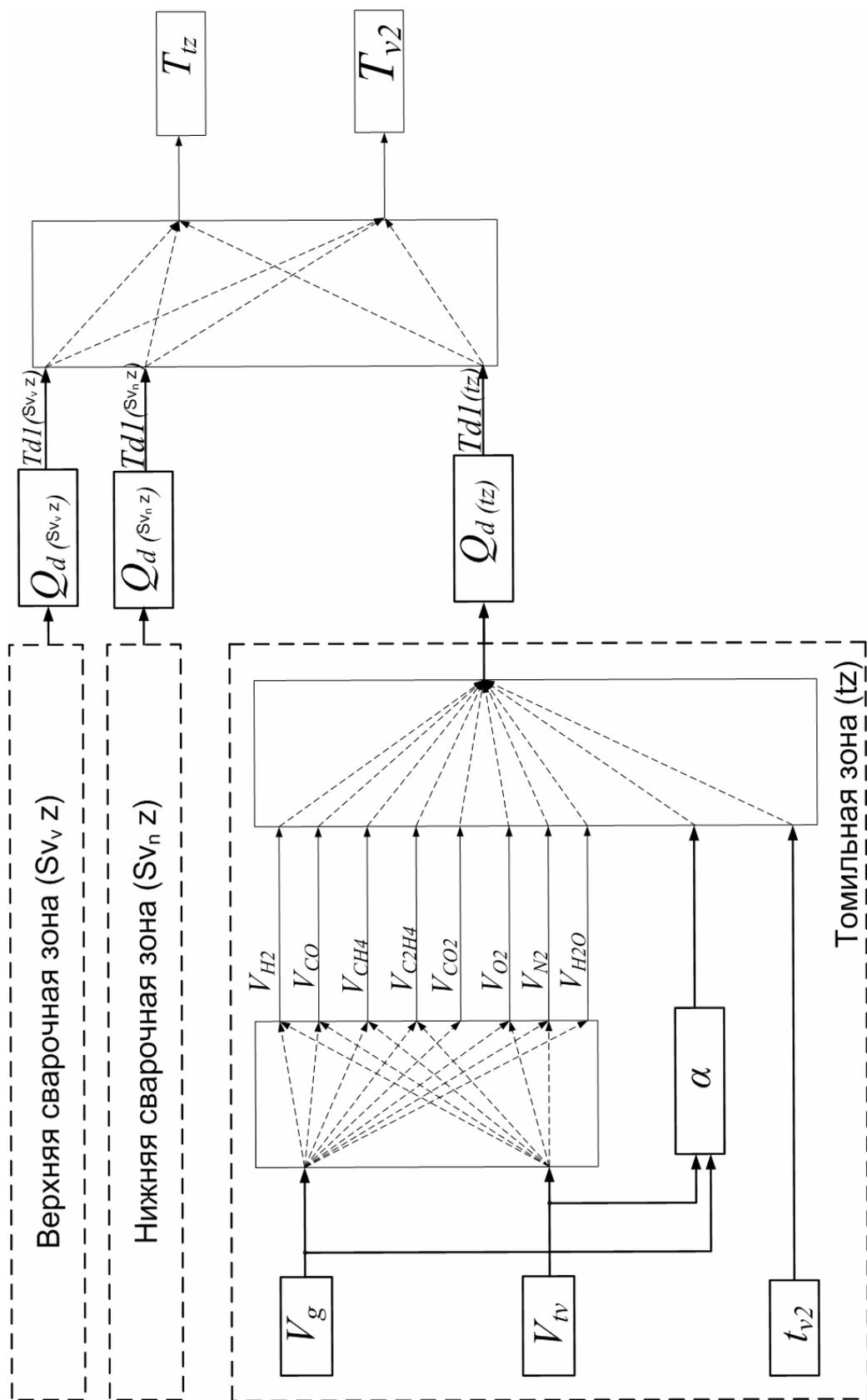


Рисунок 2 – Структурная схема модели МНП

МНП является многомерным объектом с нелинейными зависимостями системы автоматического управления нагревом слябов, входы и выходы которой влияют друг на друга [9]. Внутренняя структура многомерного объекта оказывает значительное влияние при проектировании многомерных систем управления [2].

На рисунке 2 приведена структурная схема модели МНП в соответствии с тепловым балансом (1). Объемный расход газа  $V_g$  с учетом его компонентов  $V_{H_2}$ ,  $V_{CO}$ ,  $V_{CH_4}$ ,  $V_{C_2H_4}$ ,  $V_{CO_2}$  и объемный расход воздуха  $V_a$  с  $V_{N_2}$  и  $V_{O_2}$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  с учетом температуры нагретого воздуха  $T_{v2}$  образуют дымовые газы при сгорании единицы топлива следующего состава  $V_d$ :  $V_{CO_2}$ ,  $V_{O_2}$ ,  $V_{N_2}$ ,  $V_{H_2O}$ .

Графики переходных процессов (рис.3) получены в соответствии со структурной схемой модели МНП (рис. 2) в результате расчета в среде MATLAB в диапазоне расхода топлива  $Bg = 400..660 \text{ м}^3/\text{ч}$  и следующих параметров процесса нагрева заготовок в томильной зоне МНП:  $T_{v2} = 310 \text{ }^\circ\text{C}$ , соотношении «топливо-воздух» 1:8.

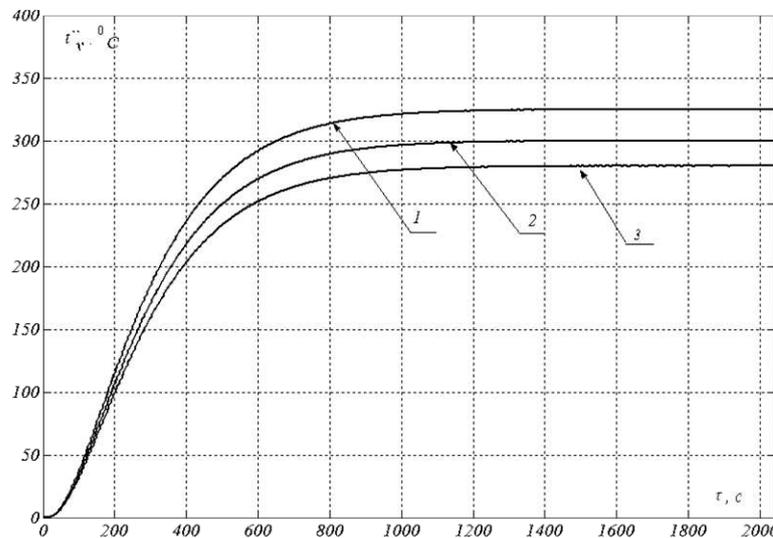


Рисунок 3 – Переходные процессы по установлению температуры в рабочем пространстве томильной зоны МНП

(1 –  $Bg = 660 \text{ м}^3 / \text{ч}$ ; 2 –  $Bg = 600 \text{ м}^3 / \text{ч}$ ; 3 –  $Bg = 400 \text{ м}^3 / \text{ч}$ )

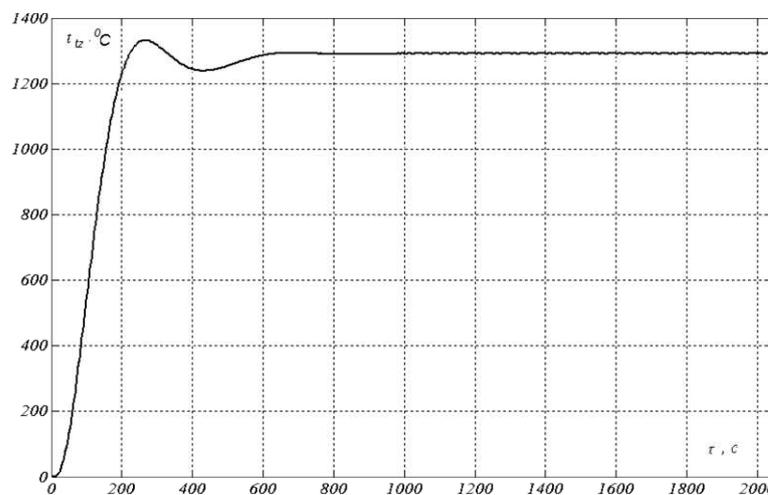


Рисунок 4 – Переходный процесс по установлению температуры рабочего пространства в томильной зоне МНП с применением ПИД - регулятора ( $Bg = 660 \text{ м}^3 / \text{ч}$ )

В томильной зоне МНП основным критерием регулирования температуры является высокая точность при отсутствии переходного процесса с перерегулированием, следовательно, в зоне этого типа необходимо применять ПИД – регуляторы [1, 9]. Динамика объекта регулирования в соответствии с полученным переходным процессом (рис.4) характеризуется основными показателями качества: установившееся значение температуры в томильной зоне МНП составляет  $Y_{уст} = 1285 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , степень затухания –  $\psi = 0,9$ , время регулирования –  $t_p = 590 \text{ с}$ ; перерегулирование –  $y = 0,0077$ .

В результате выполнения расчетов в среде MathCad получен график распределения температур по сечению заготовки, представленный на рисунке 5.

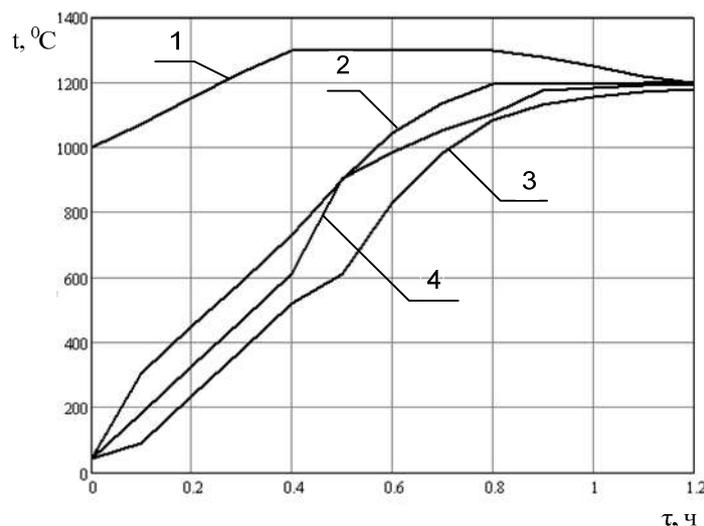


Рисунок 5 – Температурный режим МНП в среде MathCad

На рисунке 5 обозначено: 1 – температура печи; 2 и 4 – соответственно температура поверхности и центра заготовки; 3 - среднемассовая температура металла.

Максимальное колебание температурного режима имеет место при переходе обрабатываемых заготовок металла из методической зоны в сварочную зону, и соответственно из сварочной зоны в зону выдержки, при этом в зоне снижается температура рабочего пространства. Диапазон по сечению сляба составит  $\Delta t = 205 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 5), что свидетельствует о неравномерном распределении температур по сечению заготовки. Это приводит к браку при обработке давлением нагретого сляба.

При анализе температурного и теплового режимов в томильной зоне МНП выявлено неэффективность способа неполного сжигания газа.

Необходимо качественно изменить способ сжигания газа в МНП, что приведет к повышению теплового эффекта от использования природного газа.

**Выводы.**

1. Для сжигания топлива с максимальной эффективностью важно обеспечить поддержание оптимального коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , то есть подать определенное количество воздуха, при котором произойдет полное сгорание природного газа.

2. Использование энергоносителя должно сопровождаться повышением температуры воздуха и обогащением воздуха кислородом.

3. Анализ факторов, влияющих на эффективность использования топлива, позволяет исследовать уровень стабилизации температурного режима в томильной зоне МНП. Поддержание заданного режима является главной задачей автоматического управления, от способа решения которой зависит качество нагрева заготовки и эффективность использования природного газа.

## Литература

1. Бессекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бессекерский, Е. П. Попов. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман ; пер с англ. И.М. Макарова. – М.: Мир, 1984. – 541с., ил.
3. Каплан В. Г. Наладка и эксплуатация печей для нагрева металла / В.Г. Каплан. – М.: Metallurgiya, 1990. – 398с.
4. Кривандин В. А. Теплотехника металлургического производства / В.А. Кривандин. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
5. Липухин Ю.В. Автоматизация основных металлургических процессов / Ю.В. Липухин, Ю.И. Булатов. – М.: Metallurgiya, 1990. – 280 с.
6. Полухин П. И. Прокатное производство / П.И. Полухин, Н.М. Федосов. – М.: Metallurgiya, 1982. – 696с.
7. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования / М.Б. Равич. – М.: Наука, 1971. -358 с.
8. Розенгарт Ю.И. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю.И. Розенгарт, Б.Б. Потапов. – К., Донецк: Высшая школа, 1986. – 296с.
9. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / Солодовников В. В. и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 534 с.
10. Тайц Н. Ю. Методические нагревательные печи / Н.Ю. Тайц, Ю.И. Розенгарт. – М.: Металл, 1964. – 408 с.
11. D. Moyeda, M. Sheldon, R. Koppang, M. Lanyi, X.Li, B. Eleazer. Advanced steel reheat furnace. AFRC International symposium (1997) DOE Grant No. DE-FG03-96ER 12200/A000
12. Biswabrata Pradhan, Ananya Mukhopadhyay, Bhagabat Maity. Controlling Energy Utilisation at Reheat Furnace Using Time Series Model – Heldermann Verlag, Economic Quality Control .Vol 24(2009). No. 2, 195-205.

Надійшла до редакції:  
28.01.2011

Рекомендовано до друку:  
д-р техн. наук, проф. Ткаченко В.Н.

**Abstract**

*Skorobogatova I.V, Neezhmakov S.V., Gavrilenko B.V. Ways to increase fuel-use efficiency in the decision of automatic control problems. The influence of basic factors to establishment for assigned temperature modes in the malleabilizing zone of continuous reheating furnace (CRF) is analyzed. The indispensability of re-structuring operating system for automatic control temperature modes in the malleabilizing zone of CRF and improvement of quality for heating metal on application of complete combustion of fuel it is proved.*

**Keywords:** continuous reheating furnace, fuel utilization factor, heat, model, quality, stabilization.

**Анотація**

*Скоробогатова І.В., Неежмаков С.В., Гавриленко Б.В. Пути підвищення ефективності використання палива при розв'язуванні задач автоматичного керування. Проаналізовано вплив основних чинників на встановлення заданого температурного режиму в томильній зоні методичної нагрівальної печі (МНП). Обґрунтовано необхідність реструктуризації діючої системи автоматичного керування температурним режимом в томильній зоні МНП та підвищення якості нагріву металу за рахунок повного спалювання палива.*

**Ключові слова:** методична нагрівальна піч, коефіцієнт використання палива, тепло, модель, якість, стабілізація.

© Скоробогатова І.В., Неежмаков С.В., Гавриленко Б.В., 2011