

УДК 62-932.2

**И.В. Скоробогатова (асп.), Б.В. Гавриленко (канд. техн. наук, доц.)**  
Донецкий Национальный Технический Университет, г. Донецк  
кафедра горной электротехники и автоматики  
E-mail: [kitagea@rambler.ru](mailto:kitagea@rambler.ru)

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ МЕТАЛЛА В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ**

*Проанализировано особенности технологического процесса нагрева заготовки. Обоснована необходимость замены системы автоматического управления за счет применения новых технологий.*

**Ключевые слова:** камерная печь, стабилизация, режимные параметры, распределение.

### **Общая постановка проблемы**

В условиях значительного колебания стоимости энергоносителей, повышения требований к экологической безопасности производства и качества выпускаемой продукции, работа машиностроительного комплекса связана с внедрением новых технологий и получении ожидаемого энергетического эффекта от их использования.

Камерные термические печи являются основными потребителями природного газа в производстве. На некоторых заводах расход природного газа на термическую печь достигает 60% общих затрат [5]. Эффективность использования природного газа в процессе нагрева материала в камерной печи низкая.

Одним из главных направлений по использованию природного газа является применение рациональной системы управления процессом отжига материалов в камерной печи [7].

Следует отметить, что качественный нагрев металла в печи определяется минимально заданным перепадом температур по всему объему садки. То есть, равномерность нагрева слитка зависит от выбранного режима тепловой обработки металла.

Таким образом, задача управления процессом нагрева в камерных печах периодического действия заключается в обеспечении режима работы, необходимого для получения металла заданной температуры, равномерно прогретого по сечению, и проведения соответствующей термообработки [1].

### **Постановка задачи исследования**

Режим работы печей характеризуется следующими выходными параметрами: температурой нагрева и охлаждения металла, значениями промежуточных температурных остановок, длительностью нагрева, давлением, длительностью всего цикла обработки и отдельных его участков, температурой подогрева воздуха и газа, производительностью печи.

Основные возмущающие воздействия в камерных печах связаны с открытием окна при загрузке и выгрузке заготовок металла, температурного режима обработки, при изменении давления газа.

Управляющими воздействиями в системе являются: температура в печи, соотношение газ-воздух, давление в печи.

На практике указанные параметры изменяются с течением времени. Изменение параметров требует своевременного изменения температурного режима. Таким образом, при перерывах в работе заготовки нагреваются неравномерно. Это приводит к перерасходу топлива или к браку продукции, вследствие недостаточного прогрева заготовок металла.

Температурные режимы горячей обработки металла в нагревательных печах влияют на технико-экономические показатели, поэтому выбор рациональных режимов представляет важную теоретическую и практическую задачу. Система управления должна подстраивать температуру в зависимости от степени прогрева заготовки в каждой из зон печи [4].

Таким образом, необходимо оценить эффективность использования топлива при тепловой обработке слитка в камерной печи.

### Решение задачи и результаты исследования

При нагреве слитков под обработку давлением удельный перепад температуры в конце нагрева должен быть не более  $100 - 300 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{м}}$  толщины. Абсолютное значение перепада температуры составляет  $50 - 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . При термической обработке металлопродукции в камерных печах перепад по объему садки в конце режима термообработки должен отсутствовать или составлять не более  $5 - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [2].

Таким образом, при термообработке должны предъявляться жесткие требования по равномерности нагрева. Основным критерием качества, предъявляемого к нагреву металла в камерных печах, является равномерный нагрев заготовок за счет поддержания одинакового теплового потока по всей обогреваемой поверхности металла.

Анализ математических методов расчета работы камерной печи, показывает, что большая часть методов построена на моделях, учитывающих одну пространственную координату [3]. Таким образом, применение существующих методов, основой которых является использование моделей с сосредоточенными параметрами, вносит погрешность в расчет системы автоматического управления нагревом слитков в камерной печи.

Нагрев слитка описывается дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T(\tau, x, z)}{\partial \tau} = \frac{l}{c(\tau, x, z) \cdot \rho(\tau, x, z)} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x} \cdot (\lambda(\tau, x, z) \cdot \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot (\lambda(\tau, x, z) \cdot \frac{\partial T}{\partial z}) \right] \quad (1)$$

К параметрам, которые определяют внутренний теплообмен, относятся теплофизические свойства заготовки металла: теплоемкость слитка  $c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ; коэффициент теплопроводности  $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ ; плотность заготовки металла  $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

К параметрам внешнего теплообмена относятся температура газа  $T_d, \text{ }^{\circ}\text{C}$ , коэффициент конвективной теплоотдачи от газов к металлу  $\alpha, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}}$ , коэффициенты излучения (так как рассматриваемая печь — периодического действия): газ — металл  $C_{g-m}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ , газ — кладка  $C_{g-kl}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ , кладка — металл  $C_{kl-m}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$ .

Структурная схема управления тепловой нагрузкой камерной печи описывается следующим уравнением теплового баланса (рис.1) [6]:

$$Q_{nr} + Q_{fv} - Q_{d_{sum}} = Q_m + Q_{kl} + Q_{oxl} + Q_{izl} + Q_{pot} \quad (2)$$

или

$$B_g \cdot Q_{nr} + B_g \cdot V_d \cdot C_d \cdot t_d \cdot (1 - kr) = q_{g-m} \cdot F_m + q_{g-kl} \cdot F_{kl} + Q_{oxl} + Q_{izl} + Q_{pot} \quad (3)$$

где  $Q_{nr}$  — теплотворная способность топлива,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$ ;  $Q_{fv}$  — физическое тепло, вносимое подогретым воздухом,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$ ;  $Q_d$  — потери тепла с дымовыми газами,  $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$ .

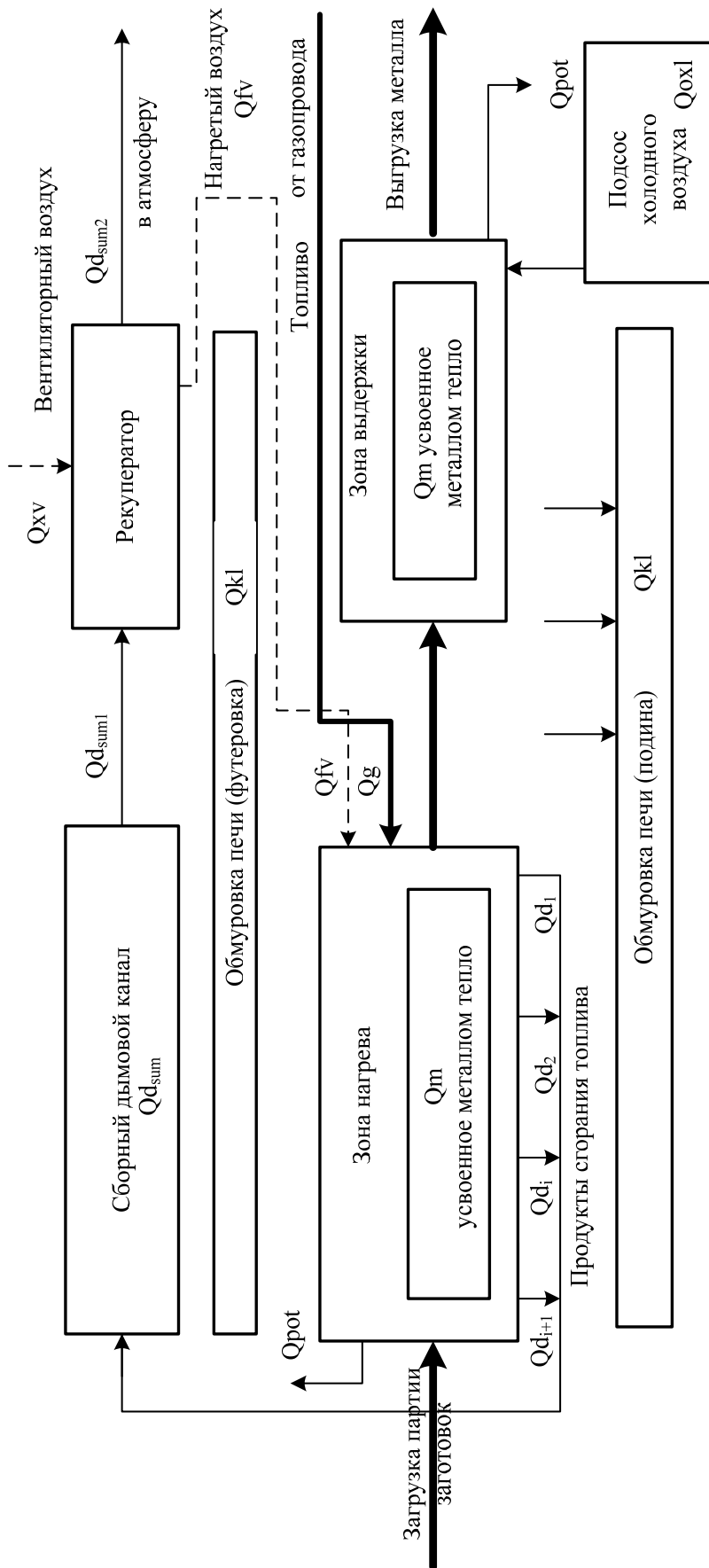


Рисунок 1 — Структурная схема управления тепловой нагрузкой камерной печи

На рисунке 2 представлена температурная карта нагрева слитка (ст. 40), рассчитанная в пакете Mathcad для камерной печи периодического действия.

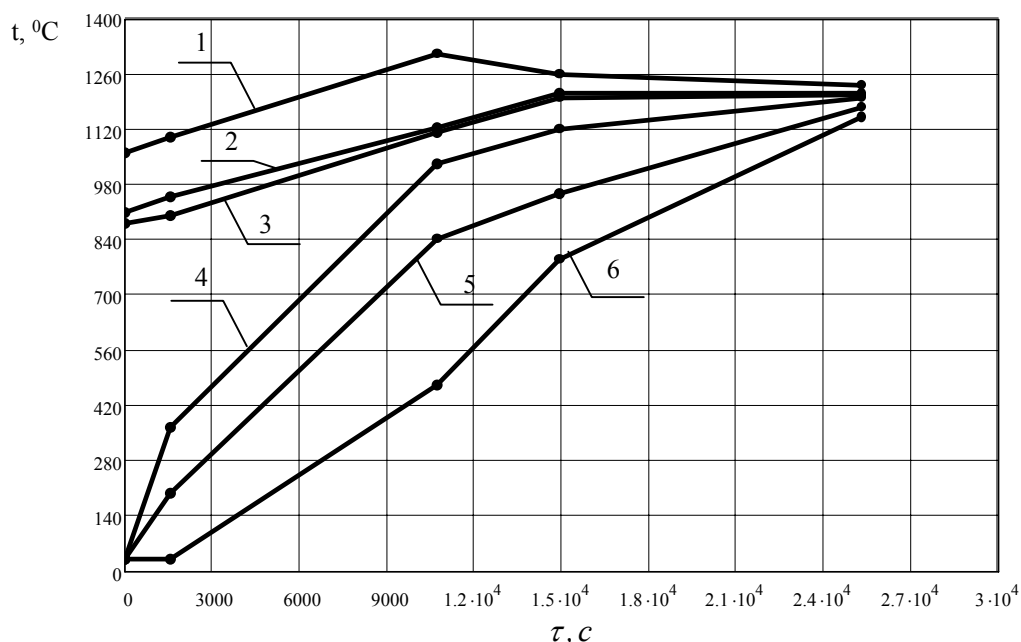


Рисунок 2 — Температурная карта нагрева слитка в печи

(1 — температура дымовых газов, 2 — температура печи, 3 — температура кладки, 4 — температура поверхности металла, 5 — среднемассовая температура слитка, 6 — температура центра заготовки)

Анализ графика 2 доказывает не соответствие нормам термической обработки слитка в камерной печи, так как перепад температур по сечению слитка в конце нагрева составляет  $29^{\circ}\text{C}$ .

Основным параметром, который определяет теплотехническую оценку топлива и экономичность использования в печи, является коэффициент использования топлива (КИТ)  $\eta$ :

$$\eta = \frac{B_g \cdot Q_{nr} - B_g \cdot Q_d \cdot (1 - k_r)}{B_g \cdot Q_{nr}} = \frac{Q_{nr} - V_d \cdot C_d \cdot t_d \cdot (1 - k_r)}{Q_{nr}} \quad (4)$$

Анализ КИТ позволяет определить, какая часть тепловой мощности остается в рабочем пространстве камерной печи и влияет на теплосодержание уходящих газов, усваивается материалом заготовки и идет на покрытие потерь теплоты в рабочем пространстве печи.

Анализ выражения (4) позволяет выявить основные факторы, влияющие на эффективность использования теплоносителя. Увеличение значения КИТ возможно за счет повышения теплоты сгорания топлива  $Q_{nr}$ ; уменьшения величин объема  $V_d$  и температуры уходящих газов  $T_d$  и повышения коэффициента рекуперации  $k_r$ .

На аккумуляцию тепла кладкой может затрачиваться до 25% в отличие от печей со стационарным режимом работы [1]. Соответственно, растет величина тепловых потерь, снижается коэффициент использования топлива. Поэтому важно обеспечить эффективность работы печи другими способами.

При работе системы управления тепловой обработкой слитков в камерной печи, узлы автоматической стабилизации, соотношения газ-воздух и давления оказывают взаимное

влияние. То есть, изменение соотношения газ-воздух  $\alpha$  и давления топлива влияют на установление температурного режима в рабочем пространстве камерной печи. Недожог топлива снижает КИТ, следовательно, необходимо поддерживать коэффициент избытка воздуха на уровне  $\alpha = 1,05 - 1,15$ . Поддержание заданного давления газообразного топлива и воздуха обеспечивает нормальную работу горелочных устройств. Следовательно, стабилизация давления газа приведет к точному измерению расхода теплоносителя.

Однако взаимное влияние контуров регулирования является односторонним, так как колебания давления топлива практически не оказывают влияние на узел соотношения газ-воздух [8].

Из анализа (4) следует, что снижение объема и температуры уходящих газов приводят к увеличению КИТ. Известно, что изменение количества воздуха и количества продуктов сгорания, вызывают изменение уровня давления в рабочем пространстве камерной печи при неизменном положении дымового клапана. К тому же, физическая теплота воздуха повышает КИТ, так как она получена за счет охлаждения дымовых газов.

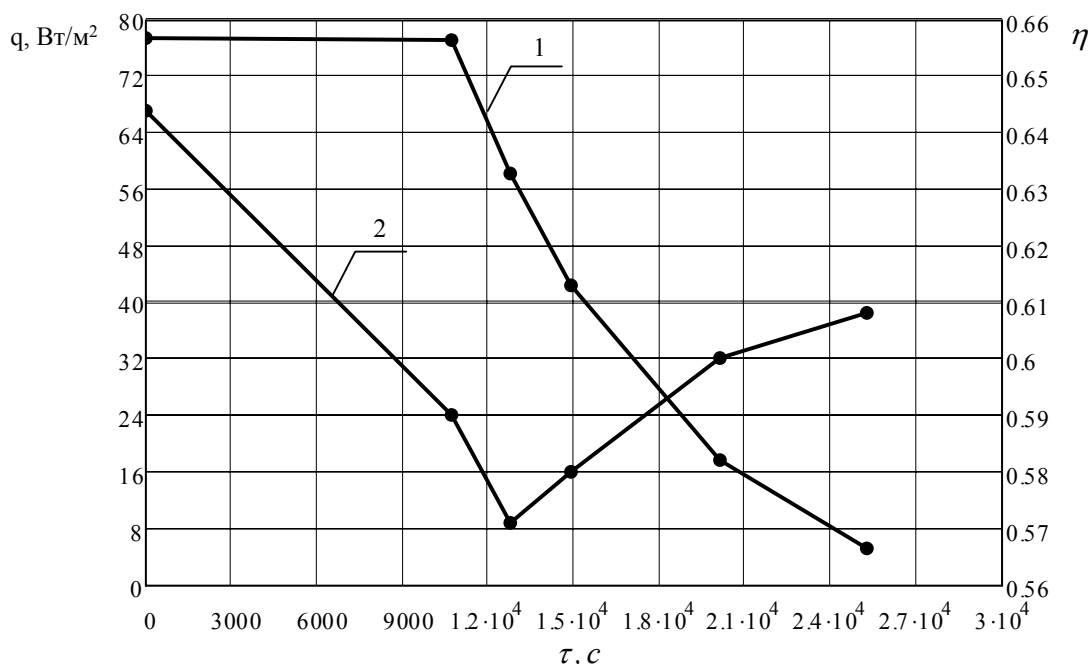


Рисунок 3 — Тепловая диаграмма процесса нагрева слитков в камерной печи (1 — плотность теплового потока, 2 — коэффициент использования топлива)

На рисунке 3 представлена тепловая диаграмма нагрева слитка. Анализ рисунка 3 позволяет сделать следующие заключения: при постоянной температуре дымовых газов КИТ снижается на 2%, что ведет к перерасходу топлива.

#### Выводы

Режим работы печи периодического действия определяется технологическими требованиями к свойствам нагреваемого металла. Температура газов в рабочем пространстве изменяется во времени (рис. 2). Для равномерного прогрева металла в камерной печи необходимо, чтобы тепловой поток по всей поверхности металла был одинаков. Повышение эффективности нагрева слитков в камерной печи невозможно без совершенствования тепловой работы печи (рис. 3). Таким образом, необходимо применять энергосберегающие режимы нагрева в печах данного типа.

Вместе с тем, периодический процесс управления температурными режимами камерной печи предполагает формирование непрерывных или дискретных управляющих воздействий с целью корректировки параметров процесса обработки в печи. Таким образом,

совершенствование системы управления температурными режимами камерной печи является актуальной задачей.

### Список использованной литературы

1. Беленький А.М. Автоматическое управление металлургическими процессами / А.М. Беленький, В.Ф. Бердышев, О.М. Блинов. — М.: Металлургия, 1989. — 384 с.
2. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. — М.: Наука, 1964. — 488 с.
3. Шевяков А. А. Управление тепловыми объектами с распределенными параметрами. / А. А. Шевяков, Р.В. Яковлева. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 208 с.
4. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман; пер с англ. И. М. Макарова. — М.: Мир, 1984. — 541с., ил.
5. Равич М. Б. Топливо и эффективность его использования / М. Б. Равич. — М.: Наука, 1971. — 358 с.
6. Кравцов В. В. Оптимизация режима нагрева в проходных нагревательных печах / В.В. Кравцов, А. Б. Бирюков, И. И. Демин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Металургія. — 2010. — Вип. 177(12). — С. 206–212.
7. Скоробогатова І.В. Питання стабілізації температурного режиму в томільній зоні методичної нагрівальної печі / І.В. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко, С.В. Неежмаков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. — 2010. — Вип. 169(18). — С. 84–91.
8. Скоробогатова І.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. — Вип. 183(21). — С. 48–54.

Надійшла до редакції:  
29.02.2012 р.

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Ткаченко В.Н.

***I.V. Skorobogatova, B.V. Gavrilenko. Control efficiency analysis of the thermal processing of metal of chamber furnace. The feature of technological process of heating preparation is analyzed. Necessity of automatic control system replacement at the expense of application of new technologies is proved.***

***Keywords:*** chamber furnace, stabilization, operating conditions, the distribution.

***I.V. Скоробогатова, Б.В. Гавриленко. Аналіз ефективності управління термічною обробкою металу в камерній печі. Проаналізовано особливості технологічного процесу нагріву заготовки. Обґрунтовано необхідність заміни системи автоматичного керування за рахунок використання нових технологій.***

***Ключові слова:*** камерна піч, стабілізація, режимні параметри, розподіл.

© Скоробогатова І.В., Гавриленко Б.В., 2012