

Рис. 11. Похибка по FeO: а) у першому; б) у третьому періоді

### Висновки

Оскільки підвищення відстані фурми над рівнем розплаву може призвести не тільки до збільшення ступеня допалювання монооксиду вуглецю до діоксиду вуглецю, але і збільшити кількість оксидів заліза у шлаці, тому при складанні системи керування враховано не тільки кількість CO<sub>2</sub> у відхідних газах, але і кількість FeO у шлаці. Для більш ефективного керування ККП шляхом регулювання одноярусної фурми запропоновано керувати процесом відповідно до періодів продувки. І в першому періоді контролювати тільки кількість оксидів заліза у шлаці, у другому вміст CO<sub>2</sub> у відхідних газах, а у третьому знову окисненість шлаку. Таким чином, завдяки поступовому регулюванню нам вдалося налаштувати систему керування процесом продувки, контролюючи кількість оксидів заліза у шлаці у допустимому інтервалі, та підвищити кількість діоксиду вуглецю у відхідних газах у середньому до 11,31 %, а брухту відповідно до 26,3 %.

Запропонований підхід може використовуватися на будь-яких об'єктах гірничо-металургійного комплексу, що мають суттєву нестационарність.

### Список літератури

1. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой / В.С.Богушевский, Л.Ф.Литвинов, Н.А.Рюмшин, В.В.Сорокин; “Киевский институт автоматки” – К.: НПК, 1998. – 304 с.
2. Богушевский В. С. Управление продувкой конвертера в режиме энергосберегающей технологии / В. С. Богушевский, Е. Н. Зубова // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта. – 2013. – С. 71 – 74.
3. Богушевский В. С. Модель керування конвертерним процесом в умовах енергосберегаючої технології / В. С. Богушевський, Е. Н. Зубова // Системний аналіз та інформаційні технології. – 2012. – С. 26.
4. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системе автоматического управления: // В.И.Гостев; – К.: “Радиоаматор”, 2008. – 972 с.
5. Богушевський В. С. Математична модель регулювання киснево-конвертерного процесу / В. С. Богушевський, К. М. Зубова // Технологічні комплекси. – 2013. № 2 (8). – С. 32 – 38.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.

УДК 681.5.08

**Е.В. Чернецкий, канд. техн. наук**

(Украина, г. Днепропетровск, Украинский государственный химико-технологический университет)

**Е.М. Томилин, Н.И. Чичикало, д-р техн. наук**

(Украина, г. Донецк, Донецкий национальный технический университет)

**О.Ю. Олейник, канд. техн. наук, Е.С. Черная**

(Украина, г. Днепропетровск, Украинский государственный химико-технологический университет)

## ОТРАБОТКА ПОВЕДЕНИЯ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ПРОХОДНОЙ ПЕЧИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

### Общая постановка проблемы

Проходные (туннельные) печи находят широкое применение в горной промышленности при сушке, обжиге руд. Обжиг иногда совмещают со спеканием руды или концентрата с активными добавками (сода, мел и др.) или компонентами шихты (обжиг с окискованием для облегчения последующей переработки). Туннельные печи также широко используются в технологическом процессе полукоксования горючего сланца.

На данный момент при проектировании промышленных туннельных печей, а также исследовании особенностей их работы часто применяется математический аппарат теории стационарного теплообмена. При этом режим работы туннельных печей приближенно можно считать установившимся, а внутренний теплообмен – стационарным.

Однако возникает вопрос: как поведет себя модель при резком изменении температуры, вызванным усадкой холодной продукции, а также при соответствующем изменении расхода топлива, вызванным отработкой регулятором возмущения.

**Постановка задач исследования**

- Промоделировать периодическое изменение температуры в первой по ходу заготовок зоне теплового агрегата.
- Установить зависимость изменения расхода топлива, вызванную отработкой регулятора.
- Изучить поведение модели тепловой работы печи, используя установленную зависимость расхода.

**Решение задач и результаты исследований**

*Моделирование периодического изменения температуры в первой зоне теплового агрегата*

Промоделируем периодическое колебание температуры на 117 °С согласно ПИД-закону в 25-й зоне печи (рис. 1) с использованием формулы [1]

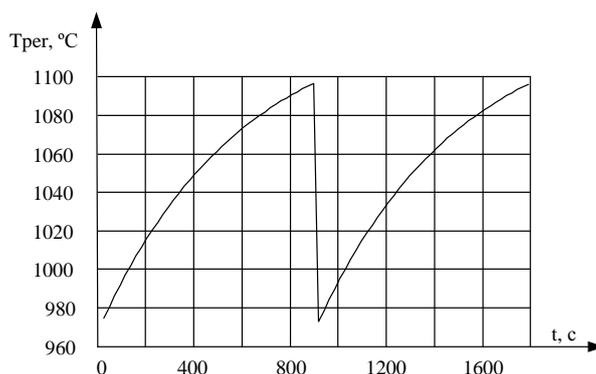
$$T_{per}(t) = \frac{\left( \frac{0,25 \cdot 3600 - t + \text{floor}\left(\frac{t}{0,25 \cdot 3600}\right) \cdot 0,25 \cdot 3600}{590} \right)}{0,7}, \quad (1)$$

где  $t$  – переменная времени; floor – функция в пакете MathCAD, которая округляет дробное число до ближайшего меньшего целого числа.

*Установление зависимости изменения расхода топлива*

Определим параметры ПИД-закона регулирования согласно работе [2]:  $\Delta t=500$ ;  $\tau_M=0,55$ ; коэффициенты: пропорциональный  $Kp = \frac{0,95}{1 \cdot \frac{\tau_M}{\Delta t}}$ ; интегральный  $Ti=2,4\Delta t$ ; дифференциальный  $Td=0,4\Delta t$ . Температура

в 25-й зоне печи изменяется согласно кривой на рис. 1.



**Рис 1. Кривая температуры в 25-й зоне печи**

Тогда выражение для определения мощности тепловыделения в 25-й зоне примет следующий вид:  

$$W(t) = Kp \left[ \text{razn}(t) + \frac{1}{Ti} \int_0^t \text{razn}(t) dt + Td \left( \frac{d\text{razn}(t)}{dt} \right) \right],$$
 где  $\text{razn}(t) = 1098 - T_{per}(t)$ , а выражение для определения расхода топлива –  $B_{T25}(t) = W(t) / Q_{нр}$ , где  $Q_{нр}$  – низшая теплота сгорания топлива.

При этом расход топлива  $B_{T25}(t)$  будет изменяться согласно кривой на рис. 2. При работе регулятора температуры в соответствии с ПИД-законом регулирования, расход топлива вначале скачкообразно увеличивается, а затем плавно понижается (рис. 2).

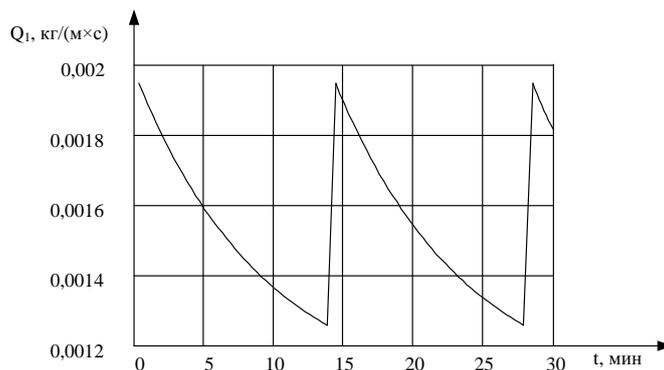


Рис. 2. Зависимость расхода газа в 25-й зоне печи при применении ПИД регулятора

*Построение математической модели тепловой работы туннельной печи*

Все пространство печи делится на совокупность поверхностных и объемных зон (рис.3). Затем для одних зон устанавливают распределение температур, а для других – распределение тепловых потоков. После этого проводят совместное итерационное решение сопряженной задачи теплообмена [3].

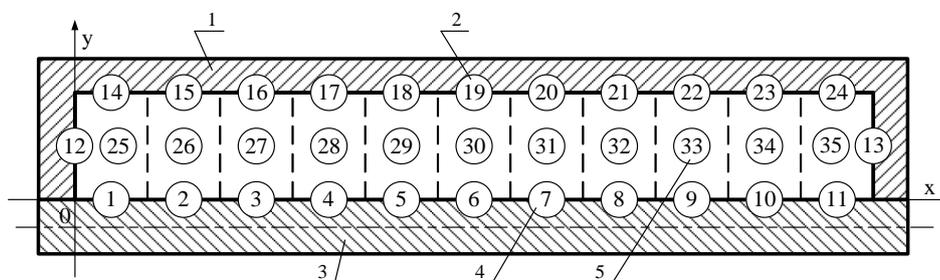


Рис. 3. Модель разбиения пространства печи

На рис. 3 приняты такие обозначения: 1 – кладка печи; 2 – поверхностные зоны кладки печи (номера 12...24); 3 – нагреваемый материал, представленный в виде непрерывного слоя; 4 – поверхностные зоны нагреваемого материала (номера 1...11); 5 – объемные газовые зоны (номера 25...35). Зоны 1...11 можно отнести к первому роду, для которых заданы температуры  $T_i$  или потоки собственного излучения  $Q_i^p$ , а искомыми являются результирующие тепловые потоки  $Q_i^p$  [3]. Зоны 12...24 можно отнести ко второму роду, для которых заданы значения потоков результирующего излучения  $Q_i^p$ , имеющих смысл потоков тепловых потерь, а искомыми являются температуры  $T_i$ . Зоны 25...35 также можно отнести ко второму роду, для которых известны значения результирующих тепловых потоков  $\tilde{Q}_i$ , соответствующих мощностям тепловыделения. Требуется определить температуры  $T_i$ .

Алгоритм определения температур внутреннего пространства проходной печи можно представить в виде последовательности решения задач внешнего и внутреннего теплообмена (см. рис. 4.).

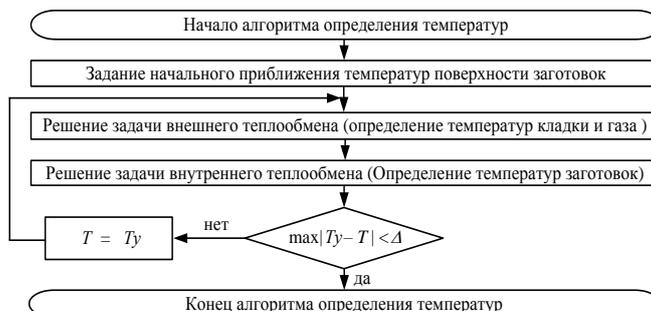
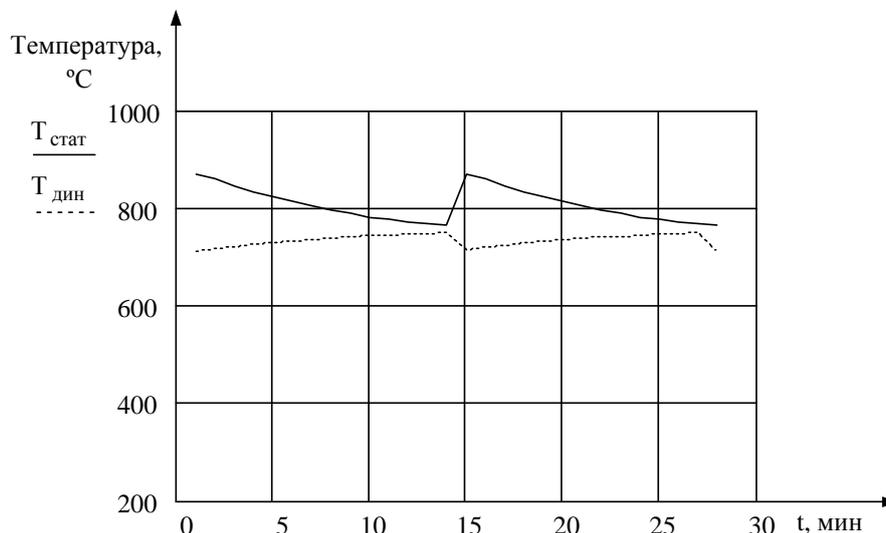


Рис. 4. Алгоритм определения температур внутреннего пространства проходной печи

На рис. 4 обозначены:  $T$  и  $T_u$  – совокупности предыдущих и последующих значений температур;  $\Delta$  – величина, определяющая погрешность расчета.

Задачу внешнего теплообмена решаем при помощи итерационного метода Ньютона, а задачу внутреннего теплообмена при помощи явной разностной схемы решения.

Таким образом, используя различные методы моделирования можно получить более достоверную информацию о температурных режимах различных зон печи. Для получения достоверной информации и анализа проводим моделирование по двум алгоритмам (внешнего и внутреннего теплообмена) и по полученным результатам строим график (рис. 5).



**Рис. 5. Кривая поведение температур в 25-й объемной зоне при работе ПИД-регулятора**

При моделировании тепловых процессов температурных зон будем использовать исходные данные, которые соответствуют параметрам реальной печи, установленной на предприятии. Полученные таким образом данные можно сравнить с результатами замеров на реальной печи. После проверки адекватности модели и ввода поправочных коэффициентов получим наиболее достоверную модель для определения температурных режимов печи.

Подставляя мгновенные значения расхода топлива 25-й зоны в описанную математическую модель работы агрегата можно получить результаты, аналогичные решению задачи [4].

На рис. 5 изображена кривая температуры в 25-й газовой объемной зоне при работе регулятора температуры с ПИД-законом регулирования. Здесь  $T_{стат}$  и  $T_{дин}$  – температуры в зоне, соответствующие статической и динамической моделям.

Значения температур в зоне, полученные по динамической модели, будут постепенно увеличиваться. Это обусловлено тем, что объект обладает инерционностью и постепенный рост температуры связан с режимом увеличением подачи топлива.

Соответственно значения температуры, полученные по статической модели, будут уменьшаться, так как эта модель определяет мгновенные значения температур теплового агрегата для мгновенных значений расхода топлива. Таким образом, изменение объема расхода топлива согласно ПИД-закону регулирования предусматривает его резкое увеличение в начальный момент времени и потом его плавное уменьшение.

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что для точного определения температурных режимов зон печи нельзя использовать только какую-то одну модель (статическую или динамическую), как это делали раньше. Необходимо проводить совместное моделирование двух режимов и определять результирующее значение путем введения в модель поправочных коэффициентов на основании сравнения результатов моделирования и прямых инструментальных замеров. Такая модель в большей степени соответствует поведению температуры в реальном объекте управления.

Разработанная математическая модель тепловой работы туннельной печи, адекватность которой проверена на реальном объекте, позволит сократить количество датчиков температуры в печи и при этом получать достоверные данные о температурных режимах различных зон печи. Это в свою очередь даст возможность выпускать более качественную продукцию при сушке, обжиге руд в проходных печах, широко использовать печи в других технологических процессах, где выдвигаются к температуре жесткие требования.

### Выводы

1. В туннельной печи при работе регулятора температуры в соответствии с ПИД-законом происходит резкое увеличение объема подачи газа к горелкам, а затем – его плавное уменьшение.
2. Модель стационарного теплообмена требует в каждый момент времени мгновенные значения расхода газа, которые оказываются завышенными.
3. Значения температур газовой зоны туннельной печи, полученные по статической и динамической моделям, вначале процесса регулирования сильно различаются. По мере наступления теплового равновесия эти значения приближаются друг к другу.
4. Целесообразно использовать комбинированную математическую модель тепловой работы туннельной печи, учитывающую совместное моделирование двух режимов и определять результирующее значение путем введения в модель поправочных коэффициентов.

### Список литературы

1. Настройка параметров ПИД-закона в регуляторах температуры МкРА [Электронный ресурс] / Режим доступа к ресурсу: <http://my.elvisti.com/show/tune1.html>. – Название с экрана.
2. ПИД-закон регулирования. Методы нахождения ПИД коэффициентов [Электронный ресурс] / Режим доступа к ресурсу: <http://www.termodat.ru/pdf/pid.pdf>. – Название с экрана.
3. Арутюнов В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников – М.: Metallurgy, 1990. — 241 с.
4. Томилин Е.М. Методология определения температурного состояния проходных печей: Монография / Е.М Томилин, Н.И Чичикало. — Донецк: Ноулидж, 2011. — 223 с.
5. Крылова Л.С. Автоматизированное проектирование камерных печей. / Л.С. Крылова, В.В. Бухмиров, С.В. Носова, меж вуз. сб. научн. трудов. Магнитогорск: 2003. — С 172-176.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Віноградовим Б.В.*

UDK 681.51/54

*A.V. Bakutin*

*(Ukraine, Dnipropetrovsk, National Mining University)*

### OPTIMAL SPEED REGULATOR OF THE METAL-CUTTING MACHINE TOOL MAIN DRIVE

**Introduction.** The stability and the transient performance of the closed control system loop is bonded with the pole and zero location of its transfer function on the s-plane. For the control system tuning with the difficult regulator, that contains some variable parameters, the root-locus method can be used, that allows to research independently the effect of the each parameter on the control system transient performance.

**Analysis of studies and publications.** On the base of the obtained control devices that belong to the area of the regulators with predetermined difficulty and carried out researches for their transient performance the conclusion was made, that the control device structure consisting of the second order polynomial in the numerator and the second order polynomial without free term in the denominator is chosen for the further synthesis of the optimal control device for the metal-cutting machine tool main drive speed loop.

**Purpose** of the paper is to study the effect of the speed regulator coefficients on the transient performance ratings by the step loading condition such as the motor speed decrease and the return time to the reference speed

**Study materials.** Assume that the control object is a squirrel cage induction motor. From the classic representation of the induction motor mathematical model with the control by varying the stator supply voltage it can be seen that it contains the cross coupling by the stator current vector components. In case of the compensation or minimization of the cross coupling influence the stator voltage vector component variation can independently set the value of the rotor flux linkage and the motor speed. Then the flux linkage and speed control channels will be divided similar to a DC motor with separate excitation. Assume that the cross coupling by the stator current vector components is compensated and the inner current loop is optimized for the technical criterion, then the control object of the electromechanical system can be described as follows [8]