

УДК 622.78

**В.А. Кривоносов, Д.С. Пирматов**

## **КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКАТЫШЕЙ В ЗОНЕ СУШКИ ОБЖИГОВОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ**

*Разработана динамическая математическая модель зоны сушки обжиговой машины (ОМ). На основе модели и наблюдателя состоян.78ия построена система контроля температурного режима. Система обеспечивает слежение за соответствием режима сушки окатышей требованиям технологического регламента. Аналогично может быть построена система контроля для всех зон ОМ.*

*Ключевые слова: обжиговая машина, динамическая математическая модель, температура слоя окатышей, система контроля температурного режима.*

**В** настоящее время железорудные окатыши являются одним из основных компонентов, используемых при выплавке стали. Производство окатышей включает в себя их термическую обработку в ОМ. Окатыши, загруженные на тележки (паллеты), в процессе технологического передела проходят последовательно зоны сушки, подогрева, обжига, рекуперации и охлаждения. Схематически поперечный разрез паллеты приведен на рис. 1.

Качество термообработки, в первую очередь, зависит от соответствия температуры окатышей регламентным значениям в каждой из технологических зон ОМ. Затраты на природный газ, сжигаемый в ОМ, составляют значительную часть себестоимости окатышей. Поэтому снижение удельных затрат энергоносителей на производство окатышей с сохранением качества продукции является весьма актуальной задачей.

Поддержания регламентного значения средней температуры материала недостаточно для обеспечения высокого качества окатышей на выходе

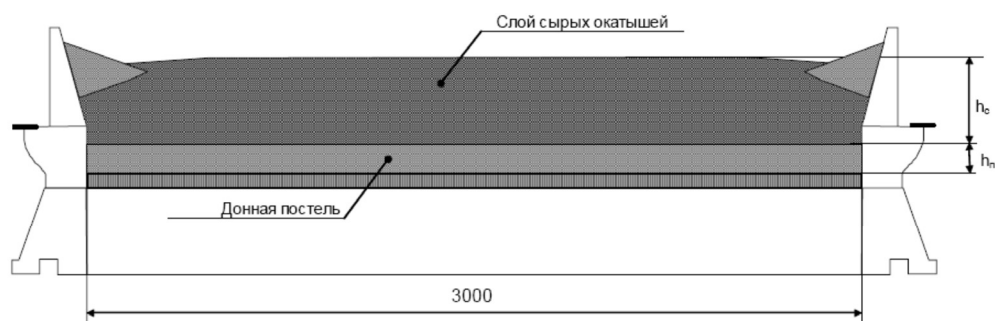
ОМ по всей толщине слоя. Оплавление гранул со стороны подачи теплоносителя или незавершенность физико-химических превращений материала с обратной стороны негативно сказывается на прочностных характеристиках обожженного продукта. Поэтому необходимо поддерживать регламентные температурные характеристики окатышей, по крайней мере, в трех точках (см. рис. 1):

верхней – на верхней границе зоны  $h_c$ ;

средней – в середине зоны  $h_c$ ;

на границе слой-постель – на нижней границе зоны  $h_c$ .

В то же время, конструкция ОМ такова, что прямое измерение температуры окатышей осуществляется только на выходе из машины, что недостаточно для обеспечения высокого качества контроля за процессом обжига. Повышение объективности контроля может быть достигнуто на основе косвенного определения температуры окатышей по результатам измерения перепада температуры и давления теплоносителя на слое окатышей в каждой технологической зоне ОМ.



**Рис. 1. Поперечный разрез паллеты ОМ с уложенным на нее слоем окатышей:**  
 $h_c$  – высота слоя сырых окатышей;  $h_n$  — высота постели

Для этого в данной статье разработана динамическая математическая модель (ММ) зоны сушки, связывающая температуры в контрольных точках слоя окатышей с измеряемыми параметрами теплоносителя, с управляющими и возмущающими воздействиями. На основе модели построен наблюдатель состояния, обеспечивающий высокую эффективность контроля температуры в заданных точках слоя окатышей. Аналогично может быть построена система контроля температурного режима в других зонах ОМ.

**1. Основные соотношения, используемые при разработке ММ теплообмена между теплоносителем и слоем окатышей**

Расчет теплообмена в двухфазных средах является сложной задачей, требующий учета различных механизмов переноса тепла. На сегодняшний день разработан ряд методов расчета теплообмена [1,2] для тел различных геометрических форм, основанных на известных законах передачи тепла. По мнению авторов, наиболее подходящей методологической основой моделирования теплообмена в слое окатышей является решение задачи Т.Шумана. Данный метод позволяет определить температуру плотного слоя и проходящего через него теп-

лоносителя в любой момент времени и на любой высоте зоны контакта.

Для прохождения теплоносителя через слой движущегося на тележках материала в ОМ предусмотрены мощные тягодутьевые машины (ТДМ), которые создают перепад давления газа по высоте слоя гранул. По известному перепаду давления  $\Delta p$  формула Эргана [1] позволяет рассчитать линейную скорость  $\omega$  перемещения газа через материал.

$$\frac{\Delta p}{h} = 150\mu\omega a + 1,75\rho_g \omega^2 b, \quad (1)$$

где  $h$  – высота слоя окатышей;  $\mu$  – динамическая вязкость газа;

$$a = \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot d^2}; \quad b = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3 \cdot d};$$

$\varepsilon$  – порозность слоя;  $d$  – средний диаметр окатышей;  $\rho_g$  – плотность газа.

Значение искомой скорости  $\omega$  является положительным корнем уравнения (1). Предварительно величину перепада давления  $\Delta p$  разделим на 1,3, так как по данным [3] известно, что сопротивление паллет на 30 % увеличивает перепад давления газа, проходящего через слой окатышей

$$\omega = \frac{-150\mu \cdot a + \sqrt{(150\mu \cdot a)^2 + 7\rho_g \cdot b \cdot \frac{\Delta p}{1,3 \cdot h}}}{3,5\rho_g \cdot b} \quad (2)$$

По известной  $\omega$  на основе критериев Рейнольдса и Нуссельта можно рассчитать суммарный коэффициент теплопередачи  $K_V$ , предложенный Китаевым [2].

Задача Шумана подразумевает переход к безразмерным величинам высоты слоя  $Y$  и времени  $Z$ :

$$Y = \frac{K_V \cdot h}{C_g \cdot \omega \cdot \varepsilon}; \quad Z = \frac{K_V \cdot t}{C_M \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_M}, \quad (3)$$

где  $t$  – длительность взаимодействия газа и материала;  $\rho_M$  – плотность материала;  $C_g$  – объемная теплоемкость газа;  $C_M$  – кажущаяся теплоемкость материала.

$$C_M = C_p + \Delta C_{суш} + \Delta C_{сид} + \Delta C_{дек} + \Delta C_{ок} + \Delta C_{дис}, \quad (4)$$

где  $C_p$  – средняя теплоемкость;  $\Delta C$  – изменение теплоемкости материала, вызванное явлениями испарения влаги (нижний индекс «суш»), дегидратации («гид»), декарбонизации («дек»), окисления («ок») и диссоциации оксидов («дис»).

По мере температурной обработки гранул в ОМ, теплоемкость материала значительно меняется. Значения средних теплоемкостей и теплопроводностей для железорудных окатышей в широком диапазоне температур приведены в [4]. Теплоемкость нельзя измерить, поэтому на практике используется среднее значение  $C_M$  в каждой зоне ОМ. Отклонение теплоемкости материала от средней величины можно оценить по изменению температуры газа на выходе из слоя.

Пользуясь значениями  $Y$  и  $Z$ , можно определить безразмерные величины температуры слоя  $\theta_M$  и газа  $\theta_g$ , в зависимости от высоты слоя и времени:

$$\theta_{M,h} = e^{-Y} \cdot \int_0^Z e^{-Z} \cdot I_0(2 \cdot \sqrt{YZ}) \cdot dZ;$$

$$\theta_g = 1 - e^{-Z} \cdot \int_0^Y e^{-Y} \cdot I_0(2 \cdot \sqrt{YZ}) \cdot dY, \quad (5)$$

где  $I_0(2 \cdot \sqrt{YZ})$  – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка по переменным  $Y$  и  $Z$ .

Переход к физическим значениям температур выполняется по формулам:

$$T_M = T'_M + (T'_g - T'_M) \cdot \theta_{M,h};$$

$$T_g = T'_M + (T'_g - T'_M) \cdot \theta_g, \quad (6)$$

где  $T_M$ ,  $T_g$  – температура материала слоя и газа соответственно;  $T'_M$ ,  $T'_g$  – температура материала и газа в начальный момент времени.

## 2. Модель теплообмена между теплоносителем и слоем окатышей

Используя приведенные выше соотношения, разработаем для первой зоны сушки две математические модели:

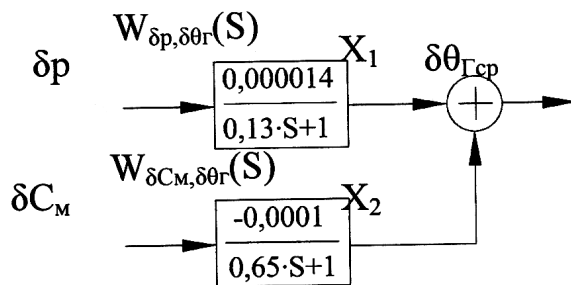
- модель охлаждения теплоносителя, проходящего через слой;
- модель нагрева слоя окатышей на различных высотах.

Входами рассматриваемых моделей являются две величины:  $\Delta p$  – перепад давления на слое окатышей и  $C_M$  – кажущаяся теплоемкость материала. Выходами:  $\theta_{g,ср}$  – температура газа на выходе из слоя,  $\theta_{M,h}$  – температура материала в трех точках, распределенных по высоте слоя. Предварительный анализ соотношений (1) – (5) показывает, что зависимости между входами и выходами являются нелинейными и динамическими. В области рабочего изменения параметров технологического режима модели могут быть линеаризованы. Для этого построим ММ в отклонениях от среднего режима.

Для линеаризованной модели входами являются следующие величины:

- отклонение  $\delta p$  от среднего значения  $\Delta p_{ср}$  перепада давления газа на слое окатышей (измеряемое управляющее воздействие);

Исходные данные	$\Delta p_{ср}, \text{Па}$	5800					
	$d, \text{м}$	0,013					
	$\varepsilon$	0,4					
	$T'_m, \text{°C}$	20					
	$T'_г, \text{°C}$	180					
	$\lambda_m$	10					
	$h_c, \text{м}$ (положение точки контроля)	0,1 (граница слой-постель)	0,25 (середина слоя)	0,4 (верх слоя)			
Расчетные параметры	Материала	$C_m, \text{Дж/м}^3 \cdot \text{К}$	950				
		$Z$	5 (соответствует выходу из секции)				
		$Y$	2,7	7	11,2		
		$\theta_m$	0,73	0,24	0,051		
	Теплоносителя	$T_m, \text{°C}$	137	58	28,5		
		$Y$	11,2				
		$Z$	1	2	3	4	5
		$\theta_{ср}$	0,08 (усредненное по $Z$ )				
$T_{ср}, \text{°C}$	31,5 (усредненное по $Z$ )						



**Рис. 2. Структурная схема двухканальной ММ охлаждения теплоносителя**

– отклонение  $\delta C_m$  от среднего значения кажущейся теплоемкости  $C_m$ , зависящее от температуры теплоносителя, входящего в слой, влажности, порозности, среднего диаметра, состава гранул и т.д. (не измеряемое возмущение).

Выходом модели охлаждения теплоносителя  $\delta \theta_{гср}$  является отклонение от среднего значения температуры газа на выходе из слоя, усредненной по длине зоны. Выходами модели нагрева слоя  $\delta \theta_m$  являются отклонения температур материала для трех рассматриваемых уровней слоя на выходе из зоны.

Средние значения параметров теплообмена в первой секции зоны сушки приведены в таблице.

Параметры теплообмена в первой секции зоны сушки (таблица).

Процесс построения линеаризованной ММ включает следующие этапы:

1) пользуясь приведенными выше соотношениями (1-5), находятся средние значения входов и выходов моделей на основе данных таблицы. Эти данные характеризуют базовый режим, отклонение от которого будет описывать модель;

2) численно решая уравнение (5) для  $\theta_g$ , строятся переходные процессы модели вначале по каналу  $\delta p - \delta \theta_{гср}$ , а затем по каналу  $\delta C_m - \delta \theta_{гср}$  при ступенчатом изменении  $\delta p$  и  $\delta C_m$  соответственно от 0 до максимально возможного значения;

3) используя метод наименьших квадратов, находятся линейные модели  $W_{\delta p, \delta \theta_g}(s)$  и  $W_{\delta C_m, \delta \theta_g}(s)$  двух каналов, переходные функции которых умноженные на  $\delta p$  и  $\delta C_m$

аппроксимируют переходные процессы, построенные на этапе 2.

В результате получена линеаризованная модель охлаждения газа, включающая параллельное соединение двух звеньев:

$$\begin{cases} W_{\delta p, \delta \theta_g}(s) = \frac{0,000014}{0,13 \cdot s + 1}; \\ W_{\delta C_m, \delta \theta_g}(s) = \frac{-0,0001}{0,65 \cdot s + 1}. \end{cases} \quad (7)$$

Структурная схема модели (7) показана на рис. 2, где  $\delta p$  – измеряемое

управляющее воздействие,  $\delta C_m$  - не измеряемое изменение кажущейся теплоемкости окатышей. Сумма  $X_1$  и  $X_2$  соответствует усредненной температуре газа на выходе из слоя  $\delta\theta_{Г.ср}$ .

ММ нагрева слоя по каналам  $\delta r$  -  $\delta\theta_m$  и  $\delta C_m$  -  $\delta\theta_m$  определена аналогично в результате выполнения этапов 2 и 3 с использованием уравнения (5) для  $\theta_{m,h}$ .

### 3. Оценка температуры слоя на основе наблюдателя состояния

В условиях реального производства средний диаметр гранул, влажность, порозность и химический состав окатышей могут колебаться в пределах зоны регламентных значений. Их общее влияние, прежде всего, выражается в изменении кажущейся теплоемкости  $C_m$  окатышей в процессе сушки, что приводит к отклонению температур газа и слоя в контрольных точках от средних значений. Предлагается оценивать величину  $\delta C_m$  изменения теплоемкости с помощью наблюдателя состояния [5] по измеряемой температуре газа на выходе из слоя, и использовать эту оценку для уточнения температур контрольных слоев окатышей.

Определим состав вектора состояния. Координаты состояния  $x_1$  и  $x_2$  показаны на рис. 2. Введем в число координат состояния наблюдателя координату  $x_3 = \delta C_m$ , для оценки текущего значения теплоемкости. Тогда:

$X = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t)]^T$  - вектор состояния.

Уравнения движения координат  $x_1$  и  $x_2$  получены по передаточным функциям  $W_{\delta r, \delta\theta r}(S)$ ,  $W_{\delta C_m, \delta\theta r}(S)$  модели охлаждения газа и имеют

вид:

$$\begin{aligned} x_1'(t) &= -7.69 \cdot x_1(t) + 1.077 \cdot 10^{-4} \cdot \delta p; & x_2'(t) &= \\ & & &= -1.538 \cdot x_2(t) - 1.538 \cdot 10^{-4} \cdot x_3(t). \end{aligned}$$

Принимая во внимание, что средняя кажущаяся теплоемкость материала меняется достаточно медленно, уравнение движения координаты  $x_3(t)$  можно записать в виде  $x_3'(t) = 0$ . Тогда в матричной форме уравнения наблюдателя в пространстве координат состояний примут вид:

$$\begin{aligned} X'(t) &= A \cdot X(t) + B \cdot U(t) + K \cdot \Delta Y(t); \\ Y(t) &= C \cdot X(t), \end{aligned} \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} -7.69 & 0 & 0 \\ 0 & -1.538 & -1.538 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

где

$$B = \begin{bmatrix} 1.077 \cdot 10^{-4} \\ -1.538 \cdot 10^{-4} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [1 \ 1 \ 0];$$

$Y(t) = X_1(t) + X_2(t)$  - вектор оценки температуры газа;  $\Delta Y(t) = \delta\theta_{Г.ср}(t) - Y(t)$  - отклонение оценки от измеренного значения;  $K = [-3.894 \ 0.666 \ -6764.1]^T$  - вектор коррекции движения наблюдателя, определяемый в процессе настройки системы.

Анализ показал, что система (8) является наблюдаемой.

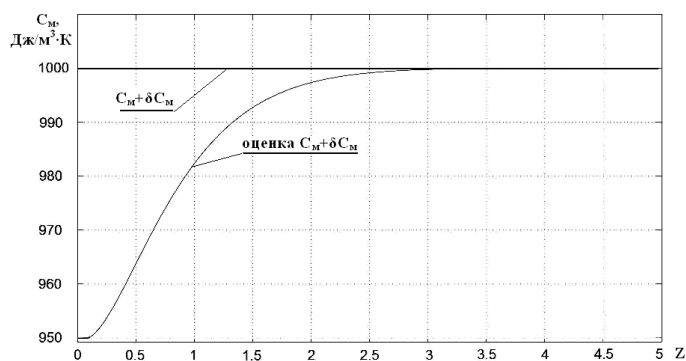
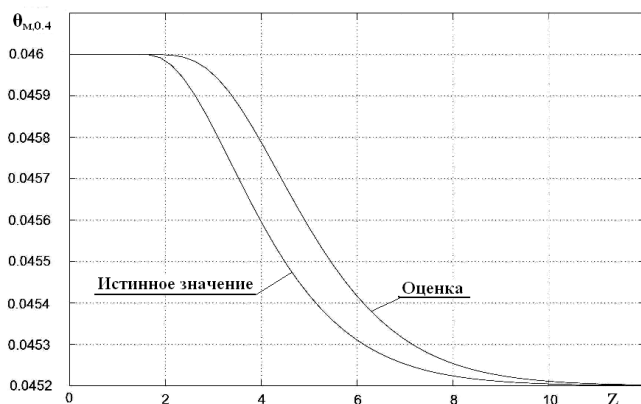


Рис. 3 Оценка кажущейся теплоемкости материала  $C_m + \delta C_m$



**Рис. 4** Безразмерная температура материала  $\theta_{м,0.4}$ , рассчитанная на основе истинного значения кажущейся теплоемкости  $C_m + \delta C_m$  и ее оценки

В режиме имитационного моделирования в момент  $Z=0$  кажущаяся теплоемкость  $C_m$  увеличилась скачком на величину  $\delta C_m$ . На рис. 3 показан процесс выхода оценки наблюдателя на истинное значение  $C_m + \delta C_m$  кажущейся теплоемкости материала.

Оценка изменения кажущейся теплоемкости использована для уточнения температуры сырья. На рис. 4 показаны графики истинного измене-

ния безразмерной температуры материала в верхней точке слоя и результат, полученный на основе значения  $C_m + \delta C_m$ , оцененного наблюдателем. Оценка температуры слоя несколько отстает от истинного значения, что связано с инерционностью наблюдателя.

### Вывод

На примере первой секции зоны сушки показана разработка наблюдателя состояния, который позволяет адекватно оценивать температуру слоя окатышей при изменении его характеристик. Аналогично, учитывая начальные условия, можно контролировать температуру слоя во всех зонах ОМ. Уточненные значения температур окатышей позволят рациональнее расходовать энергоресурсы ОМ на тепловую обработку гранул, сохранив их качество.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аэров М.Э., Толес О.М., Наринский Д.А.* Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. – Л.: Химия, 1979. – 176с., ил.
2. *Тимофеева А.С., Федина В.В.* Теплофизика металлургических процессов: Учебное пособие./Под ред. А.С Тимофеевой. – Старый Оскол: ОАО «ТНТ», 2007.-136 с.
3. *Абзалов В.М., Клейн В.И., Леушкин В.Н., Шаврин С.В.* Газодинамика слоя сырых окатышей на обжиговой машине //Сталь. 2003 №1. С. 17-20.
4. *Тимофеева А.С., Федина В.В.* Справочник теплофизика-металлурга: учеб. пособие. – Старый Оскол: Изд-во кпц «Роса», 2008. – 280 с.
5. *Гудвин, Г.К.* Проектирование систем управления / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальгадо. – М. : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2004. – 911 с. **ГИАБ**

### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Кривонос В.А.* – профессор, Старооскольский технологический институт Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
*Пирматов Д.С.* – аспирант, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru