

Парсункин Б.Н., Самарина И.Г.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

В работе рассматривается синтез автоматической системы управления на основе экспериментально-статистической модели газодинамического режима работы методической печи в условиях практической реализации энергосберегающего способа распределения тепловых нагрузок по зонам нагрева, когда в томильную зону подается до 40% общей тепловой нагрузки печи. Рассмотрено планирование и организация реализации полного факторного активного эксперимента ПФЭ  $2^5$  в реальных промышленных условиях в четырехзонной методической печи. Приведены результаты реализации плана и статистической оценки полученных результатов для синтеза адекватных моделей распределения давления по длине рабочего пространства с целью выбора наиболее представительного отбора давления для системы автоматического управления газодинамическим режимом рабочего пространства. Реализация предлагаемого в работе метода выбора отбора давления позволила реально, практически без затрат, уменьшить величину удельного расхода условного топлива на 1,7 кг/т при автоматическом управлении газодинамическим режимом методической печи.

**Ключевые слова:** газодинамический режим, давление, активный полный факторный эксперимент, статистические оценки, математические модели, эффективность, место отбора давления

### ВВЕДЕНИЕ

При производстве широкополосного горячекатаного проката из качественных марок стали для оборонной, судостроительной, трубной и других отраслей промышленности затрачивается примерно 20% потребляемого металлургией дорогостоящего природного газа.

Поэтому решение задачи энергосбережения при нагреве металла перед прокаткой является перспективной и актуальной проблемой.

Теоретически обоснованно: если есть резерв печи по производительности, то для минимизации затрат топлива необходимо интенсифицировать нагрев на заключительном интервале общего времени нагрева [1]. Реально при нестационарных режимах работы прокатного стана, когда часовая производительность изменяется от 100 до 1000 т/ч, интенсивный нагрев начинается сразу при входе металла в зоны нагрева. Такой затратный типовой режим сохраняется и при работе печи при малой производительности.

Единственным известным примером реального практического применения энергосберегающего режима нагрева являются печи листопрокатного стана 2800 металлургического комбината г. Новотроицка (бывший ОХМК). На этих печах в томильные зоны подается более 40% от общего расхода топлива на печь, а температура продуктов сгорания на выходе из печи на 200–250°C ниже, чем у печей равной производительности, работающих по типовым затратным режимам, когда в томильные зоны подается 12–15% топлива от общего на печь.

Газодинамический режим работы методической печи, определяющий распределение давления в рабочем пространстве, оказывает заметное влияние на величину тепловых потерь с выбиваниями горячих продуктов горения и с подсосами холодного атмосферного воздуха. Для минимизации тепловых потерь необходима математическая модель газодинамического режима.

В работе рассмотрены результаты практической реализации системы автоматического управления давлением в рабочем пространстве печи на основе экспе-

риментально-статистической модели газодинамического режима четырехзонной методической печи, работающей в режиме энергосберегающего распределения топлива по зонам нагрева.

### ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Необходимая исходная информация для создания экспериментально-статистической модели газодинамического режима четырехзонной методической печи получена в результате проведения активного эксперимента на печи №3 стана 2800 листопрокатного цеха.

Перед разработкой плана активного эксперимента на основе априорной информации были выявлены факторы, влияющие на величину давления по длине рабочего пространства печи. Этими факторами являются: расходы топлива в каждую зону нагрева и угол поворота дымового клапана. Расходы воздуха на каждую зону не учитывались, поскольку инжекционные горелки и схемы индивидуального регулирования соотношения топливо-воздух автоматически изменяют расходы воздуха при изменении расходов топлива [2].

Переменными состояниями (выходными величинами модели) являются величины давления  $Y_j$ , одновременно измеряемые с использованием микроманометров с наклонной трубкой типа ММН, в шести точках по длине  $j = 1, 2, \dots, 6$  рабочего пространства печи. На уровне нагреваемого металла [3].

Варьируемыми факторами являются:  $X_1$  – расход газа в томильную зону, м<sup>3</sup>/ч;  $X_2$  – расход газа во вторую сварочную зону, м<sup>3</sup>/ч;  $X_3$  – расход газа в первую сварочную зону, м<sup>3</sup>/ч;  $X_4$  – расход газа в нижнюю зону, м<sup>3</sup>/ч;  $X_5$  – угол поворота дымового клапана, % хода.

Расположение точек измерения давления  $Y_j$  и факторов  $X_i$  при проведении активного эксперимента представлены на **рис. 1**.

Таблица 1

Матрица планирования и реализация ПФЭ 2<sup>5</sup>

Но- мер опы- та	Факторы						Опыт 1					
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-0,6	-0,8	-0,4	-1,0	-1,6	-0,2
2	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-0,2	-0,8	-0,5	0,4	-1,4	-0,2
3	+1	+1	-1	+1	+1	+1	0,4	-0,6	-0,2	-0,2	-1,2	-0,1
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-0,1	-0,4	-0,6	-0,1	-1,0	-0,2
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-0,1	-0,3	-0,1	-0,1	-1,4	-2,8
6	+1	-1	+1	-1	+1	+1	0,0	-0,5	-0,6	-0,4	-0,8	-2,2
7	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-0,1	-0,4	-0,2	-0,4	-1,4	-0,5
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-0,2	-0,6	-0,5	-0,8	-1,4	-0,6
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-1,2	-2,4
10	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-0,2	-0,5	-0,6	-0,5	-1,8	-2,8
11	+1	+1	-1	+1	-1	+1	0,2	-0,1	-0,3	-0,2	-1,6	-2,2
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-0,1	-0,5	-0,6	-0,8	-2,0	-1,2
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,4	-1,4	-2,2
14	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-0,2	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-2,8
15	+1	+1	-1	-1	-1	+1	0,1	-0,1	-0,2	-0,6	-1,2	-2,4
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,0	-0,4	-0,6	-0,8	-1,4	-2,8
17	+1	+1	+1	+1	+1	-1	0,4	0,5	0,6	0,6	-0,6	-1,8
18	+1	-1	+1	+1	+1	-1	0,0	-0,2	0,4	0,1	-0,8	-2,2
19	+1	+1	-1	+1	+1	-1	0,5	0,4	0,4	0,5	-0,8	-2,8
20	+1	-1	-1	+1	+1	-1	0,2	0,1	0,6	0,2	-1,0	-0,3
21	+1	+1	+1	-1	+1	-1	0,6	0,4	0,8	0,4	-0,6	-1,8
22	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0,4	-0,1	0,2	0,1	-0,6	-2,4
23	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1,0	0,4	-0,6	0,3	-0,5	-2,0
24	+1	-1	-1	-1	+1	-1	0,3	0,2	0,2	0,0	-0,7	-2,2
25	+1	+1	+1	+1	-1	-1	0,8	0,4	0,4	0,4	-0,8	-1,8
26	+1	-1	+1	+1	-1	-1	0,1	-0,1	0,2	0,2	-1,2	-2,2
27	+1	+1	-1	+1	-1	-1	0,6	-0,2	0,2	0,6	-0,8	-1,8
28	+1	-1	-1	+1	-1	-1	0,4	-0,2	-0,1	-0,3	-1,0	-1,2
29	+1	+1	+1	-1	-1	-1	0,0	-1,2	-0,2	0,30	0,6	-1,6
30	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,0	-0,1	0,1	0,2	-0,9	-2,2
31	+1	+1	-1	-1	-1	-1	0,8	0,3	0,5	0,0	-0,5	-1,8
32	+1	-1	-1	-1	-1	-1	0,0	0,0	-1,8	-0,1	-0,6	-2,2

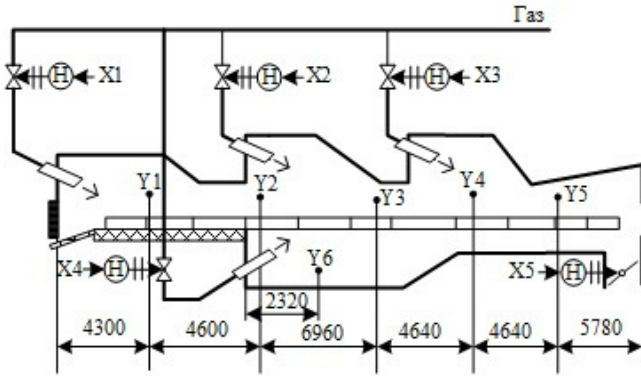


Рис. 1. Расположение точек отбора давления по длине печи и выбранных факторов

Выбраны нулевые уровни факторов  $X_{i0}$  и осуществлено их кодирование в соответствии с данными для верхних и нижних уровней при проведении эксперимента  $X_{10}=5250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $X_{20}=3900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $X_{30}=2650 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $X_{40}=1100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $X_{50}=74 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

$$X_{1B} = \frac{6500 - 5250}{1250} = +1; \quad X_{1H} = \frac{4000 - 5250}{1250} = -1;$$

$$X_{2B} = \frac{4700 - 3900}{800} = +1; \quad X_{2H} = \frac{3100 - 3900}{800} = -1;$$

$$X_{3B} = \frac{3500 - 2650}{900} = +1; \quad X_{3H} = \frac{1750 - 2650}{900} = -1;$$

$$X_{4B} = \frac{1500 - 1100}{400} = +1; \quad X_{4H} = \frac{700 - 1100}{400} = -1;$$

$$X_{5B} = \frac{98 - 74}{24} = +1; \quad X_{5H} = \frac{50 - 74}{24} = -1.$$

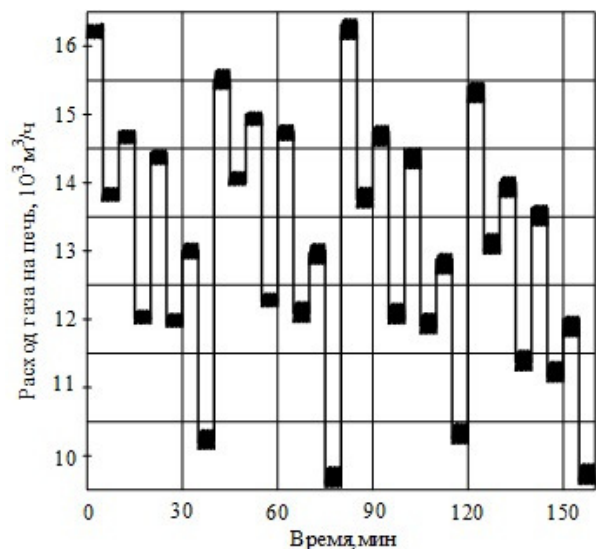
Для реализации полного факторного эксперимента (ПФЭ) в факторном пространстве выбираем область проведения эксперимента со следующими интервалами варьирования относительно нулевого уровня  $\Delta X_1=1250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $\Delta X_2=800 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $\Delta X_3=900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $\Delta X_4=400 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  $\Delta X_5=25 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

На печи №3 реализован ПФЭ 2<sup>5</sup> при отсутствии выдачи металла из печи во время ремонта стана [4, 5] при точном соблюдении плана реализации эксперимента без рандомизации опытов.

Матрица планирования и реализация ПФЭ 2<sup>5</sup> представлена в табл. 1 [6].

Изменение во времени общего расхода газа на печь в период проведения одного ПФЭ 2<sup>5</sup> представлено на рис. 2.

Для исключения оплавления находящегося в печи металла при проведении эксперимента ПФЭ 2<sup>5</sup> изменение расхода топлива по зонам осуществлялось в направлении от максимального до минимального при продолжительности каждого опыта 5 мин. Продолжительность каждого эксперимента составила 160 мин. Общая продолжительность дублированного ПФЭ 2<sup>5</sup> – 320 мин.

Рис. 2. Изменение во времени общего расхода газа на печь в период реализации одного из дублированных ПФЭ 2<sup>5</sup>

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И ОБРАБОТКА  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В качестве экспериментально-статистической модели исследуемого процесса использованы линейные полиномы, определяющие зависимость давления в выбранной точке рабочего пространства  $\hat{Y}_j$  от величины различных изменений учитываемых факторов  $X_i$  [5].

$$\hat{Y}_j = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_i X_i, \quad (1)$$

где  $b_i$  – коэффициенты уравнения;  $i$  – индекс влияющего фактора, равен 0, 1, 2... 5;  $j$  – индекс переменной состояния (давления), равен 1, 2... 6.

Прежде чем осуществлять расчеты коэффициентов уравнения (1), необходимо оценить воспроизводимость экспериментальных данных (репрезентативность).

Эта операция осуществляется с использованием критерия Кохрена-Г следующим образом [4, 8].

Рассчитываются построчные средние значения выходной переменной  $\bar{Y}_j$ .

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n Y_{jq}, \quad (2)$$

где  $\bar{Y}_j$  – среднее арифметическое переменной состояния в  $i$ -м опыте ( $i = 1, 2, \dots$ );  $N$  – количество опытов при ПФЭ  $2^5$ ;  $n$  – количество дублированных экспериментов.

Осуществляется расчет ошибки опыта или дисперсии воспроизводимости по формуле

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Y_{jq} - \bar{Y}_j)^2. \quad (3)$$

Расчетное значение критерия Кохрена  $G_p$  определяется по выражению

$$G_p = \frac{(S_i^2)_{\max}}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (4)$$

где  $(S_i^2)_{\max}$  – максимальное значение дисперсии в опытах для определенной точки рабочего пространства печи.

Расчетное значение  $G_p$  сравнивается с табличным  $G_T$ , определяется по таблице [2] для степеней свободы  $f_1 = n-1$ ,  $f_2 = N$  и при уровне значимости 0,05.

Условие воспроизводимости экспериментальных данных проверяем для каждой точки:

$$G_p \leq G_T, \quad (5)$$

Если условие (5) выполняется, то результаты эксперимента воспроизводимы. В противном случае статистические методы обработки результатов применять нельзя. Нужно выяснить источник ошибки и повторить эксперимент. Очень часто эта необходимая процедура оценки воспроизводимости экспериментального материала не осуществляется, и это причина ошибок в оценке результатов, полученных с использованием

различных компьютерных программ [8].

После определения коэффициентов уравнения (1) осуществляются статистические стандартные оценки: их значимости по критерию Стьюдента  $t_i$ ; проверка математической модели на адекватность по критерию Фишера  $F$ . Этот критерий позволяет проверить гипотезу об однородности двух выборочных дисперсий:

$$F_p = \frac{S_{ad}}{S_i^2}. \quad (6)$$

Полученные результаты представлены в табл. 2 для каждой точки рабочего пространства печи.

Полученные модели позволяют оценить влияние каждого фактора на давление в исследуемой точке по длине рабочего пространства печи.

$$\hat{Y}_1 = 0,144 + 0,128 X_1 - 0,072 X_2 + 0,001 X_3 - 0,022 X_4 - 0,175 X_5;$$

$$\hat{Y}_2 = -0,108 + 0,092 X_1 - 0,008 X_2 + 0,045 X_3 + 0,011 X_4 - 0,193 X_5;$$

$$\hat{Y}_3 = -0,061 + 0,133 X_1 + 0,083 X_2 + 0,092 X_3 + 0,123 X_4 - 0,233 X_5;$$

$$\hat{Y}_4 = 0,078 + 0,128 X_1 + 0,109 X_2 + 0,109 X_3 + 0,119 X_4 - 0,222 X_5;$$

$$\hat{Y}_5 = -0,660 + 0,049 X_1 - 0,045 X_2 - 0,171 X_3 - 0,074 X_4 - 0,343 X_5;$$

$$\hat{Y}_6 = -1,986 + 0,086 X_1 - 0,095 X_2 + 0,186 X_3 + 0,139 X_4 - 0,203 X_5.$$

Представленные модели по критерию Фишера, кроме  $Y_3$ , несмотря на значительные изменения этих критериев, адекватны, и полученные уравнения можно использовать для решения производственных задач.

Наиболее значимыми для всех точек по длине печи оказались: угол поворота дымового клапана (фактор  $X_5$ ) и расход топлива в зону с максимальным расходом (фактор  $X_1$ ) [2, 7].

Таблица 2  
Результаты статистической оценки эксперимента

$j$	$G_p, f = n-1$	$t_i, f = N(n-1)$	$F_p, f_1 = N-d$ $f_2 = N(n-1)$
	$G_T = 0,2929$	$t_T = 2,040$	$F_T = 1,840$
1	0,2645	4,182; 3,737; 2,091; 0,000; 0,636; 5,091	1,706
2	0,3353	1,884; 1,611; 0,137; 0,792; 0,191; 3,412	1,136
3	0,3195	1,559; 3,397; 2,118; 2,358; 3,317; 5,955	5,500
4	0,4433	1,385; 2,271; 1,939; 1,939; 2,105; 3,932	1,705
5	0,2880	5,341; 0,400; 0,384; 1,386; 0,602; 2,777	0,650
6	0,1370	13,856; 0,600; 0,665; 1,297; 0,970; 0,142	0,627

КРИТЕРИЙ И ВЫБОР ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОГО МЕСТА ОТБОРА ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

В качестве критерия при выборе представительного (наилучшего) места отбора импульса давления для системы автоматического управления газодинамическим режимом методической печи была принята максимальная чувствительность отбора давления на изменение расходов топлива по зонам и на изменение положения дымового клапана с учетом количества продуктов горения через  $j$ -е сечение рабочего пространства.

Определение количественной оценки принятого критерия  $I_j$  осуществляется в соответствии с выражением

$$I_j = \frac{\sum_{i=0}^{L-1} \Delta \hat{Y}_j / \Delta X_i}{(\Delta Y_j / \Delta X_s) \cdot Q_j}, \quad (7)$$

где  $i$  – номер значимого варьируемого фактора, кроме  $X_s$ ;  $L$  – количество значимых факторов уравнения регрессии для  $j$ -й переменной состояния;  $\Delta \hat{Y}_j / \Delta X_i$  – изменение переменной (давления в рабочем пространстве) в  $j$ -й точке, вызванное изменением расхода газа ( $X_i$  – факторы) на соответствующую зону  $\text{кг/м}^2/\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\Delta Y_j / \Delta X_s$  – изменение давления в  $j$ -й точке по длине печи, вызванное изменением положения дымового клапана ( $X_s$  – фактор);  $Q_j = \frac{V_{j\max}}{V_{\max}}$  – доля максимально возможного расхода продуктов сгорания через  $j$ -е сечение рабочего пространства по отношению к максимально возможному расходу продуктов сгорания, общему на печь.

$$V_{\max} = (X_{1B} + X_{2B} + X_{3B} + X_{4B}) \cdot W_T, \quad (8)$$

где  $W$  – количество продуктов сгорания, образующихся при сжигании единицы ( $1 \text{ м}^3$ ) топлива с определенным коэффициентом расхода воздуха.

Например, расчет принятого критерия оптимальности для томильной зоны [7, 9] будет таким:

$$\begin{aligned} \hat{Y}_1 &= 0,144 + 0,128X_1 - 0,072X_2 + \\ &+ 0,001X_3 - 0,022X_4 - 0,175X_5, \\ Q_j &= \frac{V_{1\max}}{V_{\max}} = \frac{6500 \text{ м}^2/\text{ч}}{162000 \text{ м}^2/\text{ч}} = 0,4, \\ I_1 &= \frac{0,144 + 0,128 - 0,072 + 0,001}{-0,175 \cdot 0,4} = -2,838. \end{aligned}$$

Критерием оптимальности выбрано условие

$$|I_j| \rightarrow \max, \quad (9)$$

По физическому смыслу коэффициент  $b_{0j}$  при факторе  $X_0$  соответствует эксперименту с поддержанием всех варьируемых факторов на средних (опорных) уровнях [5, 10–13]. Поэтому (при выполнении

условия значимости) он учитывается при расчете  $I_j$ .

С учетом соблюдения правил статистической оценки достоверности уравнений регрессии величины оценок критерия имеют вид:  $I_1=2,838$ ;  $I_2=0$ ;  $I_3=-1,256$  (при неадекватной модели);  $I_4=-2,125$ ;  $I_5=2,173$ ;  $I_6$  – не рассчитывается.

В соответствии с принятым условием (9) наиболее представительным местом отбора импульса давления для условий методических печей стана 2800 ЛПЦ является участок томильной зоны между вторым и третьим смотровыми окнами, считая от окна выдачи.

Поскольку наиболее чувствительным к изменению расходов газа и степени открытия дымового клапана является отбор в точке  $Y_1$ , то проверка соответствия расчетного значения  $\hat{Y}_1$  и действительного давления  $Y_1(\tau)$  проведена для данной точки рабочего пространства.

На рис. 3 показаны изменения расчетного (прогнозируемого)  $P_{\text{прогн}}$  и измеренного давления  $P_{\text{измер}}$  во времени.

Прогнозируемое (расчетное) и измеренное значения давления удовлетворительно совпадают.

Величина максимального абсолютного отклонения модели и реального процесса в пределах опыта не превышает  $0,125 \text{ кг/м}^2$  ( $1,226 \text{ Н/м}^2$ ).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты ПФЭ позволяют сделать обоснованный вывод: отбор импульса давления для системы автоматического управления газодинамическим режимом методической печи следует осуществлять на 200–300 мм ниже уровня, нагреваемого металла в зоне, куда подается максимальное количество топлива.

Эта рекомендация была реализована на печах с типовым распределением тепловых нагрузок широкополосного стана ОАО «ММК».

Перенос типового отбора давления со свода томильной зоны (12–15% тепловой нагрузки печи) на уровень нагреваемого металла во вторую сварочную зону (35–45% тепловой нагрузки печи) и автоматическое управление газодинамическим режимом печей широкополосного стана горячей прокатки ОАО «ММК» позволило практически без затрат уменьшить на 1,7 кг/т удельный расход условного топлива, получив значительный экономический эффект, при существенном улучшении условий обслуживания отбора давления по сравнению с расположением на своде печи.

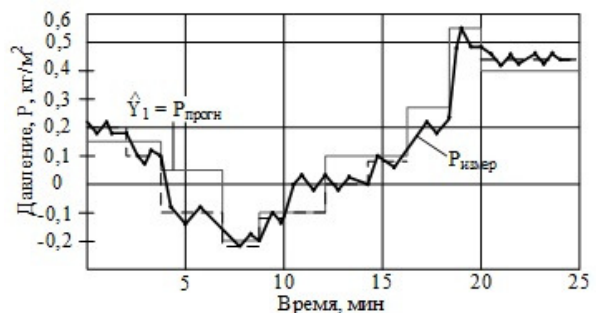


Рис. 3. Изменение прогнозируемого  $P_{\text{прогн}}$  и измеренного  $P_{\text{измер}}$  давления в томильной зоне печи стана 2800

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 375 с.
2. Статистическое исследование и моделирование экономических и технологических процессов металлургического производства: учеб. пособие / Парсункин Б.Н., Бушманова М.В., Андреев С.М. и др. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. 315 с.
3. Yan A. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace / A. Yan, T. Chai, F. Wu, P. Wang // *Journal of Control Theory and Applications*. 2008. Vol. 6, no. 1. P. 80–85.
4. Paul D. Berger, Samuel C. Hanna, Robert E. Maurer 101 Special Practice Problems in Probability and Statistics. Marsh Publications, 2005. 288 p.
5. Цимбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1986. 240 с.
6. Самарина И.Г., Мухина Е.Ю., Бондарева А.Р. Статистическая модель газодинамического режима методической печи // *Современные проблемы науки и пути их решения: сборник научных статей*. 2016. №28. С. 56–59.
7. Парсункин Б.Н., Дегтярев В.В. Определение места отбора импульса для управления давлением в рабочем пространстве методической печи // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1992. №11. С. 63–65.
8. Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 208 с.
9. Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И. Выбор температурного параметра для оперативного управления нагревом металла в методических печах // *Автоматизированные технологии и производства*. 2015. № 1 (7). С. 9–12.
10. Васильев М.И., Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Способ энергосберегающего нечёткого управления процессом горения в тепловых установках // *Автоматизированные технологии и производства*. 2016. № 1 (11). С. 66–73.
11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 202 с.
12. William P. Gardiner, G. Gettinby *Experimental Design Techniques in Statistical Practice: A Practical Software-Based Approach*. Philadelphia: Woodhead Published Limited, 1998. 392 p.
13. E.L. Lehmann, J.P. Romano. Chapter 9: Multiple testing and simultaneous inference // *Testing statistical hypotheses*. 3rd ed. New York: Springer, 2005. 786 p.

Поступила в редакцию 09 марта 2017 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

## AUTOMATIC ENERGY-SAVING CONTROL SYSTEM BASED ON A MATHEMATICAL MODEL OF THE GAS-DYNAMIC MODE OF A CONTINUOUS FURNACE

Boris N. Parsunkin

D.Sc. (Eng.), Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: pksu035@gmail.com

Irina G. Samarina

Assistant Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ig\_samarina@inbox.ru

The paper is concerned with the synthesis of the automatic control system based on the experimental statistical model of the gas-dynamic operating mode of a continuous furnace in the process of practical implementation of the energy-saving method of heat load distribution by the heating zones, when up to 40% of the total heat load of the furnace is supplied to the soaking zone.

Planning and implementation of the complete active  $2^5$  factorials were considered for a four-zone continuous furnace under actual operating conditions. The paper describes the results of the plan implementation and the statistical appraisal of obtaining the results to develop adequate models of pressure distribution along the furnace working chamber in order to choose the most representative pressure take-off for the automatic control system of the gas-dynamic mode in the working zone.

Implementation of the suggested method of pressure take-off made it possible, without any significant costs, to decrease the specific consumption of the fuel equivalent value by 1.7 kg/t when the automatic control of gas-dynamic mode of a continuous furnace is applied.

**Keywords:** Gas-dynamic mode, pressure, active complete factorial, statistical appraisal, mathematical models, efficiency, pressure take-off point.

## REFERENCES

1. Andreev S.M., Parsunkin B.N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom v pechakh prokhodnogo tipa: monografiya* [Optimization of Control Modes of Heating Through-type Furnaces. Monograph]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013, 375 p. (In Russian)
2. Parsunkin B.N., Bushmanova M.V., Andreev S.M. *Statisticheskoe issledovanie i modelirovanie ekonomicheskikh i tekhnologicheskikh protsessov metallurgicheskogo proizvodstva* [Statistical research and modeling of economic and technological processes of metallurgical production. Tutorial]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2007, 315 p. (In Russian)
3. Yan A. Chai T., Wu F., Wang P. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace. *Journal of Control Theory and Applications*. 2008. Vol. 6, no. 1. pp. 80–85.
4. Paul D. Berger, Samuel C. Hanna, Robert E. Maurer 101 Special Practice Problems in Probability and Statistics. Marsh Publications, 2005. 288 p.
5. Tsimbal V.P. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov* [Mathematical modeling of metallurgical processes. Tutorial]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1986. 240 p.
6. Parsunkin B.N., Degtyarev V.V. Determination of pulse selection space to control the pressure in the working space continuous furnace. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*

- [Steel in Translation], 1992, no.11, pp. 63–65. (In Russian)
7. Nalimov V.V. *Teoriya eksperimenta* [The theory of the experiment]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 208 p. (In Russian)
8. Samarina I.G., Mukhina E.Yu., Bondareva A.R. Statistical model of gas-dynamic mode of a continuous furnace. *Sovremennye problemy nauki i puti ikh resheniya* [Modern problems of science and their solutions], 2016, no. 28, pp. 56–59. (In Russian)
9. Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I. Selecting the temperature setting for the operational control of metal heating in continuous furnaces. *Automation of technological and production processes in metallurgy*, 2015, no. 1(7), pp. 9–12. (In Russian)
10. Vasilyev M.I., Parsunkin B.N., Andreev S.M. Energy-saving method of fuzzy control of combustion process in thermal plants. *Automation of technological and production processes in metallurgy*, 2016, no. 1(11), pp. 66–73. (In Russian)
11. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning experiment in the search for optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 202 p.
12. William P Gardiner, G Gettinby *Experimental Design Techniques in Statistical Practice: A Practical Software-Based Approach*. USA, Philadelphia: Woodhead Published Limited, 1998. 392 p.
13. E. L. Lehmann, J. P. Romano. Chapter 9: Multiple testing and simultaneous inference. *Testing statistical hypotheses*. 3<sup>rd</sup> edition: New York: Springer, 2005. 786 p.

Парсункин Б.Н., Самарина И.Г. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 2 (35). С. 55–60. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-55-60](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-55-60)

Parsunkin B.N., Samarina I.G. Automatic Energy-saving Control System based on a Mathematical Model of the Gas-dynamic Mode of a Continuous Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 55–60. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-55-60](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-55-60)