

УДК 669.162.:519.25

ПРИЛОЖЕНИЕ МАРКОВСКИХ ЦЕПЕЙ К АНАЛИЗУ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ*

*Сibaгатуллин С.К., д.т.н., профессор кафедры технологий металлургии
и литейных процессов (10skt@mail.ru)*

*Харченко А.С., к.т.н., доцент кафедры технологий металлургии и литейных
процессов (as.mgtu@mail.ru)*

*Десятченко Л.Д., к.т.н., доцент кафедры технологий металлургии и литейных
процессов (devyatleo@mail.ru)*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, Магнитогорск, Челябинская обл., Ленина, 38)

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования в динамическом формате одного из самых важных параметров всякого объекта исследования – эффективности его работы. В качестве объекта исследования выбрана доменная печь объемом 2014 м³. Основными параметрами эффективности этого объекта традиционно используют ежесуточную производительность и удельный расход кокса. В настоящей работе эти два параметра обобщены. При этом учтены разные алгебраические знаки влияния этих параметров на предложенный обобщенный показатель эффективности. С учетом вариации каждого из этих параметров на трех уровнях число уровней обобщенного показателя эффективности определилось как $3^2 = 9$, поэтому измерительной шкалой доходности от эффективной работы доменной печи рационально было принять 9-балльную шкалу. Двумерный массив первичных данных объемом $N = 177$ преобразован в переходную матрицу размера 9×9 для обработки случайных переходов показателя эффективности из одних состояний в другие методом Марковской цепи с дискретными состояниями и временем. Вычислена совокупность параметров случайного процесса: для долгосрочного прогноза – стационарный вектор вероятностей состояний, среднее время возвратности (реверса) по каждому состоянию эффективности, оценка эффективности работы доменной печи в баллах; для кратковременного прогноза – первое время перехода из каждого состояния в любое другое состояние, номер шага при «всплеске» вероятности для каждого достоверного состояния в начальный момент времени; получены компоненты показателя эффективности. Установлено, что средний уровень анализируемой эффективности доменной печи (суточная производительность $\Pi = 3702$ т и удельный расход кокса $K_{уд} = 470$ кг/т чугуна) достигается в основном за счет кратковременных переходов состояний с низкой эффективностью в состояния с высокой эффективностью и наоборот. Перевод системы на более эффективные и продолжительные состояния представляется возможным, что показала практика на этой же доменной печи. После ремонтных работ по устранению искажения профиля печи суточная производительность возросла до 5048 т при удельном расходе кокса 445 кг/т чугуна, но при этом структура переходной матрицы и расчетные показатели Марковской цепи основательно изменились в сторону увеличения вероятностей пребывания и переходов в более эффективных состояниях. Использование метода Марковской цепи с дискретными состояниями и временем позволяет оценить вероятную величину изменения показателей работы доменной печи в заданном временном интервале при неизменных уровнях параметров, характеризующих условия ее работы.

Ключевые слова: высокотемпературное моделирование, верхняя и комбинированная продувка, конвертерная ванна, реакционная зона, гидродинамика, тепломассообмен.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-649-656

В публикуемых источниках научной информации статьи по моделированию объектов связаны в основном со статикой явлений, а публикации, связанные с динамикой явлений, встречаются значительно реже. Подход к изучению случайностей на основе статистики обычно включает описание детерминированной и случайной компонент модели, при этом модели не учитывают фактор времени. Такой подход преобладает из-за удобств постоянства характеристик объекта и второстепенной роли фактора времени. В черной металлургии, в частности, при моделировании производства чугуна также преимущественно используют модели статистики [1 – 6], отображающие совершенствование режимов загрузки

ки [7 – 12] и дутья [13 – 15] с целью снижения удельного расхода кокса и повышения производительности печи, реже – связанные с временным фактором [16].

Среди основных параметров, отражающих эффективность работы доменной печи, на практике главным образом используют показатели суточной выплавки чугуна (т/сутки) и удельного расхода кокса (кг/т чугуна). Причем эти показатели часто изменяются во времени при неизменных уровнях параметров, характеризующих условия работы печи. Поэтому они могут рассматриваться как меняющиеся из-за случайного стечения обстоятельств. Следовательно, для моделирования эффективности работы доменной печи актуальной будет математическая модель, описывающая случайные процессы.

* Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки РФ № 11.8979.2017/БЧ.

Для достижения цели – динамического моделирования эффективности работы доменной печи – использовались методы Марковского процесса, в частности, Марковские цепи с дискретными состояниями и временем [17]. Дискретность времени обусловлена получением ежесуточных данных о выплавке чугуна и расходе кокса, описательная статистика которых приведена в табл. 1 для условий работы доменной печи объемом 2014 м³ ОАО «ММК». Объем выборки составил $N = 177$. Для обработки данных использовали программное обеспечение систем STATISTICA [18], Mathcad [19] и WinQSB [20].

Выборка учитываемых признаков репрезентативна, так как отбор данных осуществляли последовательно без пропусков каждые сутки на протяжении большого периода времени, а гистограммы этих признаков практически имеют нормальное распределение вероятностей (рис. 1).

Нужно заметить, что статистические данные табл. 1, хотя и получены на большом промежутке времени, однако не содержат информации о самом времени, в котором происходят изменения значений этих признаков. Фактор времени очень важно учитывать для прогнозирования показателей эффективности работы доменной печи при переходах из одних состояний в другие.

Для построения Марковской цепи, отражающей переходы состояний эффективности от настоящего к будущему, необходимо решение двух практических задач: определение самих состояний эффективности и выявление частот переходов из одних состояний в другие.

Решение первой задачи по определению числа состояний, очевидно, зависит от числа показателей эффективности. Остановимся на двух показателях: суточной производительности чугуна (Π , т/сутки) и удельном расходе кокса ($K_{уд}$, кг/т чугуна). Если каждый из этих двух показателей отобразить на трех уровнях (на низком, высоком и среднем), то получим число уровней (состояний эффективности) $n = 3^2 = 9$. Тогда по каждому показателю средний уровень можно определить как 95 %-ый доверительный интервал среднего значения, а уровни меньший и больший окажутся соответственно слева и справа от него (табл. 2).

Далее для оценки эффективности состояний оказалось нецелесообразным использовать цены на чугун и кокс, так как в условиях рынка на разных временных интервалах цены могут оказаться не постоянными. Может случиться, что в одни периоды при малом объеме выпуска чугуна его цены могут быть выше, чем при низкой производительности печи. То же может произойти и с ценами на кокс.

Следовательно, для учета эффективности работы доменной печи целесообразно использовать балльную систему относительно средних значений и по выпуску объема чугуна, и по удельному расходу кокса. Удобной для оценки эффективности работы печи оказалась девятибалльная шкала доходности от производства чугуна по аналогии с числом состояний, в котором прибывает доменная печь, переходя случайным образом из одних состояний в другие. Балльная шкала доходности от эффективности работы доменной печи приведена в табл. 2 (последний столбец).

Т а б л и ц а 1

Числовые характеристики признаков эффективной работы доменной печи

Table 1. Numerical characteristics of effective operation of blast furnace

Признаки	Среднее	Доверительный интервал, %		Минимум	Максимум	Дисперсия	Стандартное отклонение
		-95	+95				
Π , т/сут	3702	3658	3747	2579	4398	89 407	299,01
$K_{уд}$, кг/т чугуна	469,9	467,8	471,9	429,3	524,5	196,28	14,01

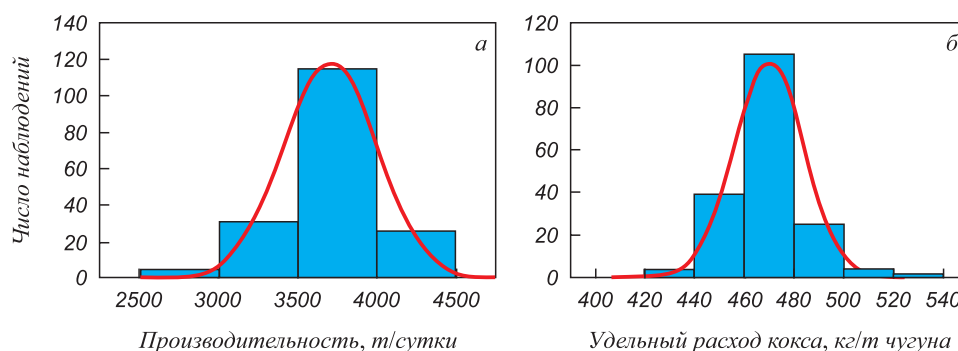


Рис. 1. Гистограмма суточной производительности (а) и удельного расхода кокса (б) доменной печи объема 2014 м³

Fig. 1. Histogram of daily production (a) and specific coke consumption (b) at a blast furnace of 2014 m³

Описание состояний эффективности работы доменной печи

Table 2. Description of the operating conditions of blast furnace

Идентификатор	Признаки состояний эффективности	Примечание	Доходность, баллы
E_1	$\Pi \in (\bar{\Pi} \pm \Delta\Pi_{\leq 95\%});$ $K \in (\bar{K} \pm \Delta K_{\leq 95\%})$	Работа печи со средними значениями технико-экономических показателей	5
E_2	$\Pi \in (\bar{\Pi} \pm \Delta\Pi_{\leq 95\%});$ $K \leq (\bar{K} - \Delta K_{> 95\%})$	Средняя производительность печи при пониженном удельном расходе кокса	6
E_3	$\Pi \in (\bar{\Pi} \pm \Delta\Pi_{\leq 95\%});$ $K \geq (\bar{K} + \Delta K_{> 95\%})$	То же при повышенном удельном расходе кокса	4
E_4	$\Pi \leq (\bar{\Pi} - \Delta\Pi_{> 95\%});$ $K \in (\bar{K} \pm \Delta K_{\leq 95\%})$	Пониженная производительность печи при среднем удельном расходе кокса	2
E_5	$\Pi \leq (\bar{\Pi} - \Delta\Pi_{> 95\%});$ $K \leq (\bar{K} - \Delta K_{> 95\%})$	То же при пониженном удельном расходе кокса	3
E_6	$\Pi \leq (\bar{\Pi} - \Delta\Pi_{> 95\%});$ $K \geq (\bar{K} + \Delta K_{> 95\%})$	Пониженная производительность печи при повышенном удельном расходе кокса	1
E_7	$\Pi \geq (\bar{\Pi} + \Delta\Pi_{> 95\%});$ $K \in (\bar{K} \pm \Delta K_{\leq 95\%})$	Повышенная производительность печи при среднем удельном расходе кокса	8
E_8	$\Pi \geq (\bar{\Pi} + \Delta\Pi_{> 95\%});$ $K \leq (\bar{K} - \Delta K_{> 95\%})$	То же при пониженном удельном расходе кокса	9
E_9	$\Pi \geq (\bar{\Pi} + \Delta\Pi_{> 95\%});$ $K \geq (\bar{K} + \Delta K_{> 95\%})$	То же печи при повышенном удельном расходе кокса	7

Решение второй задачи – это формирование первичных данных для исследований случайного процесса. Выявлялись частота вхождения и количество суток пребывания системы в каждом состоянии и частоты выхода системы в другие состояния (табл. 3).

Инструментом для анализа Марковских процессов с дискретными состояниями и временем [17, 20] служит переходная матрица $P = (p_{ij})$, где p_{ij} – вероятности перехода системы из состояния E_i в состояние E_j , $j = \overline{1, n}$, $n = 9$ – число состояний. Матрица $P = (p_{ij})$ размером $n \times n$ обладает следующими свойствами: $p_{ij} \geq 0$, $i, j = \overline{1, n}$; $\sum_{j=1}^n p_{ij} = 1$.

Ниже приведена переходная матрица P , построенная по данным табл. 3. Главная диагональ этой матрицы (элементы p_{ii}) получена непосредственно – как доля числа суток, приходящихся на i -состояние, от общего числа наблюдаемых суток (объема выборки N). Остальные вероятности $(1 - p_{ii})$ в i -строке определены пропорционально частотам переходов в j -состояние относительно суммарной частоты входов в i -состояние.

Следует заметить, что матрица P является регулярной, стационарной и эргодической, так как опи-

сывает Марковские процессы со следующими признаками:

- изменение состояний следует друг за другом через строго определенные промежутки времени (кратное суткам);
- момент начала наблюдений за поведением процесса роли не играет (вероятности p_{ii} фиксируемые);
- m -степень матрицы P имеет элементы $p_{ij} > 0$ (даже если в момент t_0 имелись $p_{ij} = 0$).

Марковские процессы используются для изучения краткосрочного и долгосрочного поведения стохастических систем [20]. В настоящей работе представим анализ системы показателей эффективности работы доменной печи, в основу которого положена переходная матрица (рис. 2).

Для регулярной эргодической переходной матрицы P вычисляются стационарные (финальные) вероятности [20]. По определению $\lim_{m \rightarrow \infty} p^{(0)} P^m = Y$, где $p^{(0)}$ – любой стохастический вектор, используемый в таком обозначении как вектор начального состояния. Тогда i -строки финальной матрицы Y содержат один и тот же стационарный вектор (y_1, y_2, \dots, y_9) , координаты которого y_i используются для вычисления среднего време-

Частоты входа (в знаменателе главной диагонали – количество суток) и выхода доменной печи объемом 2014 м³ из наблюдаемых состояний

Table 3. Frequencies of input (in denominator of the main diagonal – number of days) and output of 2014 m³ blast furnace at the observed states

Состояния	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9
E_1	5/5	1	0	0	0	3	0	1	0
E_2	2	10/10	0	0	4	0	1	3	0
E_3	0	0	10/14	0	1	1	1	0	7
E_4	1	0	0	5/10	1	2	0	1	0
E_5	0	3	1	1	11/30	3	0	3	0
E_6	0	0	2	4	3	13/30	1	0	3
E_7	0	1	0	0	0	0	4/5	0	3
E_8	1	4	0	0	1	0	1	11/36	4
E_9	1	1	7	0	1	4	0	3	17/37

$$P := \begin{pmatrix} 0,028248 & 0,194350 & 0 & 0 & 0 & 0,583052 & 0 & 0,194350 & 0 \\ 0,188701 & 0,056497 & 0 & 0 & 0,377401 & 0 & 0,094350 & 0,283051 & 0 \\ 0 & 0 & 0,079096 & 0 & 0,092090 & 0,092090 & 0,092090 & 0 & 0,644634 \\ 0,188700 & 0 & 0 & 0,056497 & 0,188700 & 0,377402 & 0 & 0,188701 & 0 \\ 0 & 0,226502 & 0,075501 & 0,075501 & 0,169491 & 0,226502 & 0 & 0,226503 & 0 \\ 0 & 0 & 0,127771 & 0,255541 & 0,191656 & 0,169491 & 0,063885 & 0 & 0,191656 \\ 0 & 0,242938 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,028249 & 0 & 0,728813 \\ 0,072419 & 0,289676 & 0 & 0 & 0,072419 & 0 & 0,072419 & 0,203391 & 0,289676 \\ 0,046527 & 0,046527 & 0,325689 & 0 & 0,046527 & 0,186109 & 0 & 0,139582 & 0,209039 \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Переходная матрица

Fig. 2. Transition matrix

ни τ_{ii} возвращения системы в состояние E_i , $\tau_{ii} = 1/y_i$, а при задании вектора доходности $C = (c_1, c_2, \dots, c_9)$ и при умножении его скалярно на стационарный вектор получаем доходность системы в установившемся ее финальном состоянии, включая, естественно, и компоненты доходности от каждого из состояний. Результаты представлены табл. 4.

Стационарные вероятности интерпретируются как среднее время пребывания системы в наблюдаемых состояниях для очень длительного периода работы. Возвратным называют состояние системы, если оно вновь может быть достигнуто спустя m шагов.

Средняя производительность доменной печи в наблюдаемый период составляет 5,049 т/сутки при удельном расходе кокса около 470 кг/т чугуна, что отвечает такой эффективности (табл. 2), если бы печь постоянно пребывала в состоянии E_1 (средние технико-экономические показатели работы). Однако печь в состоянии E_1 пребывает весьма редко и непродолжительно, зато более продолжительны доходные состояния E_8 и E_9 ,

и с коротким временем возвратности наблюдается нивелирование доходами в состояниях E_4 , E_5 и E_6 с низким уровнем доходности.

Стохастические системы удобно также рассматривать в пошаговом режиме, причем наряду с переходной матрицей для прогноза состояний системы вводят вектор начального ее состояния $p^{(0)} = (p_1^{(0)}, p_2^{(0)}, \dots, p_n^{(0)})$. Переходная матрица $P = (p_{ij})$ от шага к шагу изменяется, стремясь к своему предельному формату, и для числа m шагов определяется как m -степень матрицы P . Вектор последующих состояний системы запишется как $p^{(m)} = p^{(m-1)}P = p^{(0)}P^m$, откуда следует возможность прогнозировать среднее время соответствующих переходов, $\tau_{ij}^{(m)} = \frac{1}{p_j^{(m)}}$. В табл. 5 приведена информация о первом времени перехода из состояний E_i в состояния E_j .

Из табл. 5 очевидно, что исследуемая доменная печь устойчиво сохраняет следующую тенденцию переходов:

Результаты поиска основных параметров Марковской цепи по состояниям эффективности работы доменной печи объемом 2014 м³

Table 4. Results of the search for the main parameters of Markov chain in conditions of 2014 m³ blast furnace operation

Параметры состояний	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9
Стационарные вероятности	0,051	0,106	0,108	0,053	0,132	0,156	0,041	0,138	0,214
Возвратность (в сутках)	20	9	9	19	8	6	24	7	5
Компоненты доходности	0,255	0,636	0,432	0,106	0,396	0,156	0,328	1,242	1,498

Данные расчета о первом времени перехода системы из каждого состояния E_i (строки) в другие E_j состояния (столбцы)

Table 5. Calculation data of first transition of the system from each state E_i (rows) to the other E_j states (columns)

Переходы состояний	$E_i \rightarrow E_1$	$E_i \rightarrow E_2$	$E_i \rightarrow E_3$	$E_i \rightarrow E_4$	$E_i \rightarrow E_5$	$E_i \rightarrow E_6$	$E_i \rightarrow E_7$	$E_i \rightarrow E_8$	$E_i \rightarrow E_9$
E_1	20	10	12	20	9	4	24	8	7
E_2	16	9	13	22	6	8	22	7	7
E_3	21	12	9	22	10	7	23	10	3
E_4	17	11	13	19	8	5	25	8	7
E_5	20	9	12	20	8	7	24	7	7
E_6	20	12	11	16	8	6	24	10	6
E_7	20	10	10	23	10	8	24	9	3
E_8	18	8	12	23	9	8	23	7	5
E_9	20	12	8	22	10	7	25	9	5

- из любого состояния система весьма длительное время входит в состояние E_7 (в среднем около 24 суток), и самое короткое время затрачивается для входа в состояние E_9 (в среднем 5,5 суток) – это очень эффективное состояние, особенно E_8 (со средним ожиданием 8,3 суток);

- в малоэффективные состояния ($E_4 - E_6$) вхождение происходит также из любого состояния, однако продолжительное время затрачивается только для E_4 (в среднем около 21 суток), в остальные же состояния – в среднем около 7 суток;

- состояние E_1 со средней технико-экономической эффективностью случается не чаще 19 суток, но лучшее E_2 и худшее E_3 для средней имеют время ожидания около 11 и 10 суток соответственно.

Представляет также интерес временной параметрический анализ для прогноза вероятностей пребывания системы в период, например, с 1 по 10 циклы с шагом, равным единице (по суткам), если в начальный момент времени t_0 система находится в определенном состоянии E_i . Например, если достоверно известно, что система находится в состоянии E_2 , то вектор начального состояния будет иметь вид $p^{(0)} = (0, 1, 0, \dots, 0)$.

Для всякого вектора $p^{(0)}$, используя пошаговые процедуры, описанные выше, определяем m -шаговый вектор $p^{(m)} = (p_1^{(m)}, p_2^{(m)}, \dots, p_n^{(m)})$, где вероятность i -состояния, $i = \overline{1, n}$ ($n = 9$) после m шагов.

Временной параметрический анализ выполнялся по каждому состоянию при условии достоверного нахождения системы в начальный момент времени t_0 в этих состояниях, результаты сведены в табл. 6.

Обратим внимание, что эргодические системы, как правило, склонны к стабилизации, и переходный процесс в них протекает кратковременно. Поэтому финальное состояние системы достигается быстро, а первые переходы обычно содержат экстремальные уровни вероятностей, которые также кратковременно определяют параметры состояний эффективности работы системы.

Временной параметрический анализ эффективности работы исследуемой доменной печи в текущих условиях ее эксплуатации выявил следующее.

- В каждом состоянии обнаруживается «всплеск» вероятности в основном на втором шаге ($m = 2$) относительно начала наблюдения, за исключением состояний E_1 и E_7 (при $m = 3$) и E_8 , где наблюдаемая вероятность

Временной параметрический анализ вероятностей состояний с 1 по 10 сутки

Table 6. Temporal parametric analysis of states probabilities from the 1st to the 10th day

Время, сутки	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9
1	0,028	0,056	0,079	0,056	0,170	0,169	0,028	0,203	0,209
2	0,052	0,230	0,235	0,114	0,195	0,216	0,024	0,194	0,330
3	0,058	0,115	0,133	0,077	0,136	0,175	0,049	0,154	0,241
4	0,052	0,125	0,130	0,057	0,142	0,161	0,039	0,146	0,235
5	0,052	0,111	0,117	0,057	0,135	0,159	0,041	0,141	0,223
6	0,052	0,110	0,113	0,054	0,134	0,157	0,041	0,139	0,219
7	0,052	0,107	0,111	0,053	0,133	0,157	0,041	0,139	0,217
8	0,051	0,107	0,110	0,053	0,133	0,156	0,041	0,138	0,214
9	0,051	0,106	0,109	0,053	0,132	0,156	0,041	0,138	0,215
10	0,051	0,106	0,109	0,053	0,132	0,156	0,041	0,138	0,215

$p_8^{(m)}$ монотонно снижается от $p_8^{(1)} = 0,203$ до своей стационарной величины $y_8 = 0,138$.

• Существенная величина «всплеска» (по убыванию) наблюдалась в состояниях E_2 , E_3 и E_9 , где соответственно $p_2^{(2)} - p_2^{(1)} = 0,174$, $p_3^{(2)} - p_3^{(1)} = 0,156$ и $p_9^{(2)} - p_9^{(1)} = 0,121$, а минимальная – в E_1 , где $p_1^{(3)} - p_1^{(1)} = 0,03$, при этом состояние E_7 имеет два, незначительно отличающихся экстремума: $p_7^{(2)} = 0,027$ и $p_7^{(3)} = 0,049$.

• «Всплески» вероятностей относительно стационарных состояний кратковременны, но оказывают влияние на соответствующие компоненты эффективности работы доменной печи, максимально – в состоянии E_2 на 1,044 балла, а минимально – в состоянии E_6 на 0,047 балла.

• При $t > 3$ от начала наблюдения за эффективностью доменного процесса при условии достоверности какого-либо его состояния прогнозирование вероятностей пребывания в этом состоянии ухудшается из-за стремления к стационарной вероятности, а сохранение состояния или переход в другие зависит от вероятностей (компонент) t -шагового вектора состояний $p^{(m)} = p^{(m-1)}P$.

Наиболее характерные графики прогноза вероятностей состояний системы, в которых она достоверно находилась в начальный момент времени, построены по данным табл. 6 на рис. 3.

Выводы. Предлагаемые параметры эффективности работы доменной печи, основанные на суточной производительности и удельном расходе кокса, позволили определить переходную матрицу P , используемую для анализа Марковской цепи переходов данной системы эффективности из одних состояний в другие. Долгосрочное прогнозирование вероятностей пребывания системы в каждом ее состоянии адекватно подтверждается выборкой длительного наблюдения за переходами

состояний системы в условиях ее стабилизации. Кратковременное прогнозирование вероятности состояния возможно на двое-трое суток от начального момента наблюдений при условии достоверного пребывания системы в данном состоянии. Средние уровни удельного расхода кокса и производительности доменной печи обеспечиваются в основном за счет кратковременного пребывания системы с низкими и высокими уровнями эффективности. Перевод системы на более продолжительную работу доменной печи в состояниях с более высокой производительностью и низким уровнем удельного расхода кокса возможен при определении новых технологических режимов процесса и, следовательно, новой матрицы наиболее возможных переходов

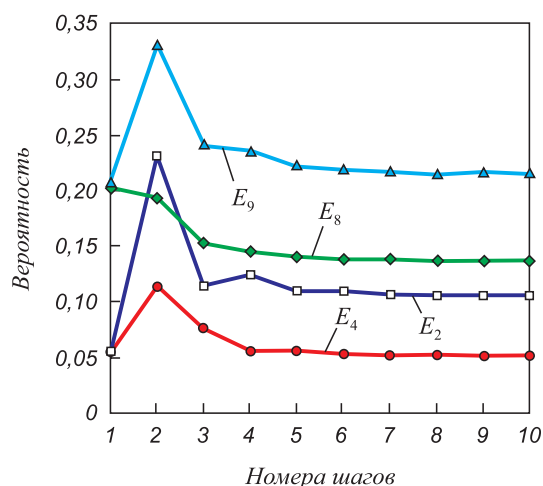


Рис. 3. Прогноз пошаговых вероятностей для состояний с разными уровнями их стационарных вероятностей (сверху вниз) E_9 , E_8 , E_2 и E_4

Fig. 3. Forecast of stepwise probabilities for states with different levels of their steady-state probabilities (from top to bottom) E_9 , E_8 , E_2 and E_4

в выгодные состояния. Как показала практика на этой же доменной печи после ремонтных работ по устранению искажения профиля печи, суточная производительность выросла до 5048 т при расходе кокса 445 кг/т чугуна, при этом структура переходной матрицы и параметры Марковской цепи существенно изменились за счет увеличения вероятностей пребывания и переходов в более эффективных состояниях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Spirin N. A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Pavlov A.V. Use of Contemporary Information Technology for Analyzing the Blast Furnace Process // Metallurgist. 2016. Vol. 60. No. 5-6. P. 471 – 477.
2. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А., Девярых Т.О., Спири́н Н.А. К математическому моделированию шахтных печей с плавлением материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 6. С. 424 – 430.
3. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А., Девярых Т.О., Спири́н Н.А. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 9. С. 634 – 638.
4. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А., Девярых Т.О., Спири́н Н.А. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 1. С. 19 – 23.
5. Павлов А.В., Полинов А.А., Спири́н Н.А., Онорин О.П., Лавров В.В. Использование модельных систем для решения новых технологических задач в доменном производстве // Металлург. 2017. № 6. С. 35 – 40.
6. Непрерывный автоматический контроль, количественная оценка и оптимизация параметров зоны плавления с помощью двумерной математической модели, учитывающей процессы по высоте и сечению доменной печи от уровня засыпки до чугунной летки / Паршаков В.М., Третьяк А.А., Полинов А.А., Павлов А.В., Прохоров И.Е., Колосов А.В., Довженко П.Ю. Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII международного конгресса доменщиков. – М.: ИД «Кодекс», 2017. С. 328 – 341.
7. Buchwalder J., Dobroskok V.A., Lonardi E., Goffin R., Thillen G., Köhler S. Contemporary blast furnace top charging practices // Stahl und Eisen. 2008. No. 4. P. 47 – 54.
8. Zhao-jie Teng, Shu-sen Cheng, Peng-yu Du, Xi-bin Guo. Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2013. Vol. 20. Is. 7. P. 620 – 626.
9. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Logachev G.N. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. Vol. 86. P. 531 – 537.
10. Pykhteeva K.B., Zagainov S.A., Tleugabulov B.S., Filippov V.V., Nikolaev F.P., Belov V.V. Stabilizing the composition of blast-furnace products from titanomagnetites with a nonconical loading trough // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. P. 45 – 49.
11. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Devyatchenko L.D., Steblyanko V.L. Improvement of iron ore burden components distribution when charging into blast furnace top by physical and mathematical modeling of fixed effects // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. No. 4. С. 694 – 701.
12. Tonkikh D.A., Karikov S.A., Tarakanov A.K., Koval'chik R.V., Kostomarov A.S. Improving the charging and blast regimes on blast furnaces at the azovstal metallurgical combine // Metallurgist. 2014. Vol. 57. No. 9-10. P. 797 – 803.
13. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A. Processing solutions for optimum implementation of blast furnace operation // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 3-4. P. 285 – 293.
14. Сибгагуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А., Селиванов В.Н., Чернов В.П. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. № 1. С. 37 – 44.
15. Спири́н Н.А., Гилева Л.Ю., Лавров В.В., Исто́мин А.С., Гури́н И.А., Буры́кин А.А., Щипанов К.А. Оптимизация распределения природного газа в доменном цехе при изменении параметров плавки // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2014. № 6. С. 45.
16. Onorin O.P., Spirin N.A., Istomin A.S., Lavrov V.V., Pavlov A.V. Features of blast furnace transient processes // Metallurgist. Vol. 61. No. 1-2. P. 121 – 126.
17. Taha H.A. Operations Research: An Introduction. 8th ed. – Prentice Hall, 2006. – 838 p.
18. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
19. Кирьянов Д.В. Mathcad 13. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 528 с.
20. Yih-Long Chan. WinQSB. London. 2003. – 240 p.

Поступила 13 ноября 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 8, PP. 649–656.

APPLICATION OF MARKOV CHAINS TO THE ANALYSIS OF BLAST FURNACE OPERATION EFFICIENCY

S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, L.D. Devyatchenko

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The article presents the results of modeling in a dynamic format of one of the most important parameters of any research object – the efficiency of its work. As the object of investigation, a blast furnace with a volume of 2014 m³ was chosen. The main parameters of the efficiency of this object are traditionally used daily productivity and specific consumption of coke; these two parameters were generalized in this paper. In this case, various algebraic signs of the influence of these parameters were taken into account in the generalized efficiency index. Taking into account the variation of each of these parameters at 3 levels, the number of levels of the generalized efficiency index

was determined as $3^2 = 9$, therefore it was rational to take a 9-point scale with the measuring scale of profitability from the efficient operation of the blast furnace. The two-dimensional array of primary data of the volume $N = 177$ was transformed into a 9×9 transitional matrix for processing of random transitions of the efficiency index from one state to another by the Markov chain method with discrete states and time. The set of parameters of the random process is calculated: for the long-term forecast – the stationary vector of state probabilities, the average time of recurrence (reversal) for each efficiency state, the evaluation of the blast furnace efficiency in points; for a short-term forecast – the first time of transition from each state to any other state, the step number for a “burst” of probability for each reliable state at the initial moment of time, and the components of the efficiency index are obtained. It was established that the average level of the analyzed efficiency of the blast furnace (daily output 3702 tons and specific coke

consumption 470 kg/ton) is achieved mainly due to short-term transitions of low-efficiency states to high-efficiency states and vice versa. The transfer of the system to more efficient and prolonged conditions is possible, and as practice has shown on the same blast furnace after repair works to eliminate the distortion of the furnace profile, the daily productivity has increased to 5048 tons with a specific coke consumption of 445 kg/t, but the structure of the transition matrix and the calculated indicators of the Markov chain have fundamentally changed in the direction of increasing the probabilities of stay and transitions of the system in more efficient states. The use of the Markov chain method with discrete states and time makes it possible to estimate the probable value of the change in the parameters of the operation of a blast furnace in a given time interval with constant levels of parameters characterizing the conditions of its operation.

Keywords: blast furnace, process efficiency indicators, Markov chains, forecasting.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-8-649-656

REFERENCES

1. Spirin N. A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Pavlov A.V. Use of contemporary information technology for analyzing the blast furnace process. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 5–6, pp. 471–477.
2. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. The mathematical design of mine stoves with materials melting. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 6, pp. 424–430. (In Russ.).
3. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 634–638. (In Russ.).
4. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 1, pp. 19–23. (In Russ.).
5. Pavlov A.V., Polinov A.A., Spirin N.A., Onorin O.P., Lavrov V.V. Use of Model Systems for Solving New Technological Problems in Blast-Furnace Production. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 5–6, pp. 448–454.
6. Parshakov V.M., Tret'yak A.A., Polinov A.A., Pavlov A.V., Prokhorov I.E., Kolosov A.V., Dovzhenko P.Yu. Continuous automatic control, quantitative evaluation and optimization of parameters of melting zone using two-dimensional mathematical model that takes into account processes of height and cross section of the blast furnace from the charge level to iron taphole. In: *Metallurgiya chuguna – vyzovy XXI veka. Trudy VIII mezhdunarodnogo kongressa domenshchikov* [Metallurgy of cast iron – challenges of the XXI century. Proceedings of the 8th Int. Congress of Blast Furnacemen]. Moscow: ID Kodeks, 2017, pp. 328–341. (In Russ.).
7. Buchwalder J., Dobroskok V.A., Lonardi E., Goffin R., Thillen G., Köhler S. Contemporary blast furnace top charging practices. *Stahl und Eisen*. 2008, no. 4, pp. 47–54.
8. Zhao-jie Teng, Shu-sen Cheng, Peng-yu Du, Xi-bin Guo. Mathematical model of burden distribution for the bell-less top of a blast furnace. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2013, vol. 20, Issue 7, pp. 620–626.
9. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Logachev G.N. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, vol. 86, pp. 531–537.
10. Pykhteeva K.B., Zagainov S.A., Tleugabulov B.S., Filippov V.V., Nikolaev F.P., Belov V.V. Stabilizing the composition of blast-furnace products from titanomagnetites with a nonconical loading trough. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. pp. 45–49.
11. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Devyatchenko L.D., Steblyanko V.L. Improvement of iron ore burden components distribution when charging into blast furnace top by physical and mathematical modeling of fixed effects. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017, vol. 52, no. 4, pp. 694–701.
12. Tonkikh D.A., Karikov S.A., Tarakanov A.K., Koval'chik R.V., Kostomarov A.S. Improving the charging and blast regimes on blast furnaces at the azovstal metallurgical combine. *Metallurgist*. 2014, vol. 57, no. 9–10, pp. 797–803.
13. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A. Processing solutions for optimum implementation of blast furnace operation. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 3–4, pp. 285–293.
14. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A., Selivanov V.N., Chernov V.P. Improvement of blast-furnace process by increasing natural gas flow through gas dynamics in the upper stage of heat transfer. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2017, vol. 15, no. 1, pp. 37–44. (In Russ.).
15. Spirin N.A., Gileva L.Yu., Lavrov V.V., Istomin A.S., Gurin I.A., Burykin A.A., Shchipanov K.A. Optimization of natural gas distribution in blast furnace shop when changing melting parameters. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 6, pp. 45. (In Russ.).
16. Onorin O.P., Spirin N.A., Istomin A.S., Lavrov V.V., Pavlov A.V. Features of blast furnace transient processes. *Metallurgist*. Vol. 61, no. 1–2, pp. 121–126.
17. Taha H.A. *Operations Research: An Introduction*. 8th ed. Prentice Hall, 2006, 838 p.
18. Borovikov V. *STATISTICA. Iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere: Dlya professionalov* [STATISTICA. The art of computer data analysis: For professionals]. St. Petersburg: Piter, 2003, 688 p. (In Russ.).
19. Kir'yanov D.V. *Mathcad 13* [Mathcad 13]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2006, 528 p. (In Russ.).
20. Yih-Long Chan. *WinQSB*. London, 2003, 240 p.

Acknowledgements. The results were obtained within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation no. 11.8979.2017/БЧ.

Information about the authors:

S.K. Sibagatullin, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgy Technology and Casting Processes" (10skt@mail.ru)

A.S. Kharchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy Technology and Casting Processes" (as.mgtu@mail.ru)

L.D. Devyatchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Mathematics (devyatleo@mail.ru)

Received November 13, 2017