МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ НА КОЛЕБАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В ЧУГУНЕ

П. П. СЕМЕНЮК, главный инженер;

Р. Е. ВЕЛИКОЦКИЙ, ведущий инженер технического отдела, velikotsky@gmail.com;

*Н. А. РУМЯНЦЕВА, инженер технического отдела
(Алчевский металлургический комбинат, Украина, г. Алчевск)*

Аннотация. Проблема влияния технологических факторов аглодоменного производства на содержание кремния и, особенно, колебания Si (ΔSi) в чугуне является актуальной для современной металлургии.

Традиционные методы и схемы исследований ведения доменной плавки в настоящее время считаются менее точными и эффективными по сравнению с современными методиками математического и компьютерного моделирования, так как последние дают реальную возможность прогнозировать и оптимизировать многочисленные технологические параметры доменного передела.

Задачей исследования является комплексный математический анализ зависимости между температурой горячего дутья (ТГД) и ΔSi при помощи универсальной математической модели, специально созданной и адаптированной под производственные условия работы аглодоменного производства Алчевского металлургического комбината (АМК).

Изучено влияние ТГД (X-Factor) на минимизацию ΔSi (Y-Factor). Комплексный математический анализ выполнен на статистических данных за 65 месяцев работы доменной печи АМК объемом 3000 м³. Приведены результаты расчетов влияния ТГД на ΔSi при помощи универсальной математической модели. Достигнута минимизация ΔSi при оптимизации ТГД. Точность расчетов по разработанной модели составляет более 99 % от фактической производственной статистики.

Ключевые слова: аглодоменное производство; доменная печь; температура горячего дутья; содержание кремния в чугуне; минимизация колебаний концентрации кремния в чугуне; универсальная математическая модель; комплексный математический анализ.

Ссылка для цитирования. Семенюк П.П., Великоцкий Р.Е., Румянцев Н.А. Математическое моделирование влияния температуры горячего дутья доменной печи на колебания содержания кремния в чугуне // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 9. С. 25–31.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-9-25-31

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Проблема влияния технологических факторов аглодоменного производства на содержание кремния и, особенно, колебания Si (ΔSi) в чугуне продолжает быть актуальной для современной металлургии [1, 2]. В условиях нестабильности обеспечения металлургического производства качественными материалами данная проблема приобретает особую актуальность. Традиционные методы и схемы исследований [3, 4] ведения доменной плавки в настоящее время считаются менее точными и эффективными по сравнению с современными методиками математического и компьютерного моделирования и математического анализа [5, 6], так как последние дают реальную возможность прогнозировать и оптимизировать многочисленные технологические параметры доменного передела. Таким образом, прогнозирование содержания кремния в чугуне является важной задачей, успешное решение которой позволит надежно обеспечить управление качеством выпускаемого чугуна.

Современная доменная плавка, являясь исключительно сложным и энергоемким процессом, характеризуется огромным числом (порядка

400) контролируемых параметров. Эффективное управление технологическим процессом требует постоянной оценки многочисленных параметров. В условиях современного производства доменщики стремятся контролировать максимально доступное число параметров плавки. Как правило, информация хранится в базах данных и в той или иной мере используется автоматизированными системами управления и системами поддержки принятия решений на уровне отдельных печей или доменного цеха в целом.

Для прогноза химического состава чугуна и шлака в настоящее время применяется множество информационных методов прогноза временных рядов, таких как метод группового учета аргументов (МГУА), нечеткий метод группового учета аргументов (НМГУА), четкие и нечеткие нейронные сети, а также метод адаптивной авторегрессии.

Особое место в методах прогнозирования занимает фильтр Калмана [7], широко используемый при прогнозировании как теплового состояния доменной печи, так и химического состава чугуна на выпуске. Его преимущества заключа-

ются в том, что он удобен для цифровых вычислений в реальном масштабе времени, имеет рекуррентную форму и легко обобщается на многомерный и нестационарный случай. Однако к основным недостаткам калмановской фильтрации можно отнести относительно большой объем необходимой априорной информации, которая, как правило, точно не известна. В первую очередь это относится к статистическим характеристикам шумов состояния и шумов измерения. Поэтому при практическом использовании фильтра Калмана может наблюдаться неограниченное возрастание фактических ошибок фильтрации во времени, которое известно как явление расходимости фильтра и заключается в увеличении ошибки смещенности [8]. Для предотвращения расходимости фильтра на практике широко используют методы субоптимальной фильтрации [9], основанные на искусственном завышении коэффициента усиления фильтра.

Априорная неопределенность начальных параметров при построении математической модели оцениваемых процессов характерна и для прогнозирования содержания кремния в чугунах на выпуске доменной печи.

В работе [10] предпринята попытка найти закономерности влияния нескольких технологических факторов доменного производства на содержание кремния в чугунах. Авторы предлагают формулу (1) для расчета содержания кремния в чугунах, состоящую из пяти факторов:

$$Si = -2,19 - 2,386 \times 10^{-3} V_{\text{пр}} + 3,421 \times 10^{-3} V_{\text{к}} + 1,498 \times 10^{-3} t_{\text{д}} - 4,954 \times 10^{-3} \varphi + 3,096 \times 10^{-3} K, \quad (1)$$

где Si — содержание кремния в чугунах на выпуске, %; $V_{\text{пр}}$ — расход природного газа, $\text{м}^3/\text{т}$ чугуна; $V_{\text{к}}$ — расход кислорода, $\text{м}^3/\text{т}$ чугуна; $t_{\text{д}}$ — температура дутья, $^{\circ}\text{C}$; φ — влажность дутья, $\text{г}/\text{м}^3$; K — расход кокса, $\text{кг}/\text{т}$ чугуна.

Согласно данным авторов [10], коэффициент множественной корреляции R для формулы (1) составил 0,609, а критерий надежности μ — 10,3. Также авторами работы [10] были получены уравнения парной корреляции для пяти исследованных факторов:

$$Si = 0,89 - 2,386 \times 10^{-3} V_{\text{пр}}; \quad (2)$$

$$Si = 0,85 + 3,421 \times 10^{-3} V_{\text{к}}; \quad (3)$$

$$Si = -0,55 + 1,498 \times 10^{-3} t_{\text{д}}; \quad (4)$$

$$Si = 1,03 - 4,954 \times 10^{-3} \varphi; \quad (5)$$

$$Si = -0,93 + 3,096 \times 10^{-3} K. \quad (6)$$

Для формул (2)–(6) коэффициент множественной корреляции находился в интервале 0,465–0,583. Авторы работы [10] считают, что повышение расхода природного газа и влажности дутья способствует уменьшению содержания кремния в чугунах, а увеличение концентрации кислорода в дутье и его температуры — наоборот, возрастанию количества восстановленного кремния.

Особо примечательно следующее мнение [10]. Исследователи считают, что повышение температуры дутья сопровождается экономией кокса, сопровождаемой снижением содержания кремния в чугунах, т. е. изменение параметров дутьевого режима оказывает двойственное влияние на содержание кремния в чугунах. По-видимому, присутствуют такие факторы (X-Factor), которые преобладают над остальными и определяют характер связи между параметрами дутьевого режима и концентрацией кремния. Иными словами, авторы работы [10] дают понять, что на изменение содержания кремния в чугунах оказывают влияние неизвестные для них X-Factor, обладающие большей силой влияния, чем выше рассмотренные.

В работе [11] представлена модель динамики изменения массовой доли кремния по выпускам из доменной печи. Авторы данной работы считают, что прогноз изменений содержания химических элементов жидких продуктов плавки может быть выполнен на каждый выпуск или режу, а частота прогноза температуры тела холодильников в зависимости от технологических потребностей может составлять от ежеминутного прогноза до прогноза каждого выпуска чугуна. К тому же авторы работы [11] предполагают, что в перспективе эта динамическая однофакторная модель может быть дополнена не только прогнозом изменений периодов циклических изменений хода доменной печи, но и сможет учитывать взаимосвязь между массовыми долями химических элементов чугуна на основе микромоделей, т. е. стать многофакторной моделью. Примечательно также установленная авторами работы [11] закономерность того, что применение Фурье-преобразований рядов данных применительно к исследованию цикличности хода доменной печи позволило выявить скрытые циклические изменения массовых долей химических элементов чугуна и определить их периоды.

Таким образом, анализ многочисленных литературных источников и материалов научных разработок по данной тематике исследований свидетельствует о перспективности применения комплексного математического анализа и математического моделирования параметров аглодоменного передела с целью оптимизации и прогнозирования технологических процессов металлургического производства чугуна, стали и металлопроката.

Постановка задачи

Задачей исследования является комплексный математический анализ (КМА) зависимостей между:

- температурой горячего дутья (ТГД) и колебаниями концентрации кремния в чугуна на выпуске (ΔSi);
- ТГД и степенью тесноты корреляционной связи (СТКС);

– ΔSi и СТКС, полученных при помощи универсальной математической модели (УММ), специально созданной и максимально адаптированной под современные производственные условия работы аглодоменного производства Алчевского металлургического комбината (АМК).

Изложение материала и его результаты

Изучено влияние ТГД (X-Factor) на минимизацию ΔSi (Y-Factor). Значения ΔSi рассчитывались как отклонение от среднестатистического значения Si за исследуемый период. КМА выполнен на основании статистических данных за 65 месяцев (2009–2014 гг.) работы доменной печи № 1 АМК объемом 3000 м³.

Представленная ниже хронология КМА выполнена в соответствии с разделом “Постановка задачи”.

Зависимость между ТГД и ΔSi представлена на рис. 1. Степень аппроксимации данной зависимости составляет более 95 %. Согласно рис. 1 минимизация ΔSi наблюдается для ТГД около 1060 °С. Более точное оптимальное значение ΔSi представлено на рис. 2. Согласно рис. 2 абсолютный минимум значений ΔSi имеет место при ТГД 1063,2 °С.

значений ТГД 1064,6 °С (рис. 5) и составляет 68,685 %.

Рис. 2. Зависимость между ТГД и ΔSi (значения ТГД в интервале от 1062 до 1064 °С)

Fig. 2. Dependence between TGD and ΔSi (values of TGD in the interval from 1062 till 1064 °C)

Рис. 1. Зависимость между температурой горячего дутья (ТГД) и ΔSi

Fig. 1. Dependence between hot blast temperature (TGD) and ΔSi

Зависимость между ТГД и СТКС представлена на рис. 3. Степень аппроксимации данной зависимости составляет более 54 %. Согласно рис. 3 высокая СТКС сохраняется для значений ТГД 1063,2 °С (см. рис. 2) и составляет 68,655 % (рис. 4). Максимальная СТКС для зависимости между ТГД и СТКС имеет место для

Рис. 3. Зависимость между ТГД и СТКС (значения СТКС в интервале от +1 до -1)

Fig. 3. Dependence between TGD and CTKC (correlation link degree) (values of CTKC in the interval from +1 till -1)

Рис. 4. Зависимость между ТГД и СТКС (значения СТКС в интервале от $-0,6864$ до $-0,6868$)

Рис. 5. Зависимость между ТГД и СТКС (значения СТКС в интервале от $-0,6865$ до $-0,6869$; значения ТГД в интервале от 1063 до 1066 °C)

Fig. 5. Dependence between TGD and CTKC (values of CTKC in the interval from $-0,6865$ till $-0,6869$; values of TGD in the interval from 1063 till 1066 °C)

Для оценки степени достоверности полученной критической точки f (см. рис. 1) незначительной разницей между максимальной СТКС для значений ТГД $1064,6$ °C (см. рис. 5) и $1063,2$ °C (см. рис. 2), равной около $0,03$ % ($68,685 - 68,655 = 0,030$, или $0,03$ %), можно полностью пренебречь. Поэтому установленное значение ТГД $1063,2$ °C, соответствующее минимуму ΔSi , имеет очень высокую степень достоверности.

Зависимость между ΔSi и СТКС представлена на рис. 6. Степень аппроксимации данной зави-

симости высокая и составляет более 89 %. Максимальная СТКС наблюдается для ΔSi $0,0265$ % (рис. 7) и соответствует критической точке g , равной 77 % на оси абсцисс (рис. 8).

Рис. 6. Зависимость между ΔSi и СТКС (значения ΔSi в интервале от $-0,1$ до $+0,1$; значения СТКС в интервале от -1 до $+1$)

Fig. 6. Dependence between ΔSi and CTKC (values of ΔSi in the interval from $-0,1$ till $+0,1$; values of CTKC in the interval from -1 till $+1$)

Рис. 7. Зависимость между ΔSi и СТКС (значения ΔSi в интервале от $-0,06$ до $+0,05$; значения СТКС в интервале от $-0,2$ до $-0,8$)

Fig. 7. Dependence between ΔSi and CTKC (values of ΔSi in the interval from $-0,06$ till $+0,05$; values of CTKC in the interval from $-0,2$ till $-0,8$)

Минимальное значение ΔSi , равное 0 (точка j на оси ординат), соответствует СТКС $60,83$ % (рис. 9).

Рис. 8. Зависимость между ΔSi и $CTKC$ (значения ΔSi в интервале от $-0,017$ до $-0,035$; значения $CTKC$ в интервале от $-0,73$ до $-0,77$)

Fig. 8. Dependence between ΔSi and $CTKC$ (values of ΔSi in the interval from $-0,017$ till $-0,035$; values of $CTKC$ in the interval from $-0,73$ till $-0,77$)

Рис. 9. Зависимость между ΔSi и $CTKC$ (значения ΔSi в интервале от $-0,001$ до $+0,001$; значения $CTKC$ в интервале от $-0,60$ до $-0,62$)

Fig. 9. Dependence between ΔSi and $CTKC$ (values of ΔSi in the interval from $-0,001$ till $+0,001$; values of $CTKC$ in the interval from $-0,60$ till $-0,62$)

Анализ полученных результатов

Согласно зависимости между ΔSi и $CTKC$ (см. рис. 3) при применении оптимальной ТГД $1063,2^\circ C$ (см. рис. 1) с целью минимизации ΔSi невозможно добиться 100 % обнуления колебаний кремния в чугуне, так как наибольшая $CTKC$ имеет место для ΔSi $0,0265\%$ (см. рис. 6). Иными словами, применение на практике ТГД, равной $1063,2^\circ C$, будет способствовать получе-

нию с наибольшей степенью вероятности ΔSi $0,0265\%$. Степень вероятности получения нулевого значения ΔSi по сравнению с ΔSi $0,0265\%$ будет примерно на $16,2\%$ ($77,00 - 60,83 = 16,17$) меньше (при использовании относительной шкалы вероятности получения ΔSi , равного $0,0265\%$) и составит 100% , а нулевого значения ΔSi — 79% ($100 - 16,17/77,00 \times 100 = 79$).

Дальнейшие перспективные направления исследований

Логичным продолжением исследований является осуществление комплексного математического анализа для всех существующих технологических параметров доменной плавки (расхода дутья, содержания кислорода в дутье и т. д.), аналогичного ранее опубликованному комплексному математическому анализу влияния содержания железа в агломерате на колебания кремния в чугуне [12]. Также актуальным является рассмотрение алгоритма математического моделирования технологии аглодоменного производства с целью расчета и прогнозирования содержания Si и абсолютной минимизации (обнуления) значений ΔSi ; математическое моделирование для расчета и прогнозирования содержания Si и ΔSi ; осуществление максимальной адаптации УММ к современным (нестабильным) условиям работы АМК.

В перспективе планируется произвести также комплексный математический анализ влияния всех технологических процессов (X-Factor) аглодоменного производства и состава шихтовых материалов, наиболее актуальных для производственников, на поведение и характер зависимостей любых технологических и производственных факторов (Y-Factor) для различных доменных печей, так как созданная универсальная математическая модель, адаптированная к реальным, т. е. современным/нестабильным условиям работы аглодоменного передела АМК, позволяет решать разнообразные по своей сложности и масштабности производственные, технические, технологические и экономические задачи по прогнозированию и оптимизации с высокой степенью достоверности.

Выводы

1. Абсолютный минимум значений ΔSi имеет место при ТГД 1063,2 °С.
2. Применение на практике ТГД, равной 1063,2 °С, будет способствовать получению с наибольшей степенью вероятности ΔSi 0,0265 %.
3. Степень вероятности получения нулевого значения ΔSi по сравнению с ΔSi 0,0265 % будет примерно на 16,2 % меньше.
4. При использовании относительной шкалы вероятность получения ΔSi , равного 0,0265 %, будет составлять 100 %, а нулевого значения ΔSi — 79 %.
5. Точность прогноза содержания Si и ΔSi , получаемых при помощи КМА и УММ, составляет более 99 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Смирнов Л.А. и др. Условия доменной плавки с низким содержанием кремния в чугунах // *Сталь*. 2013. № 8. С. 7–10.
2. Морозова Д.А., Шаповалов А.Н., Потапов М.Г. Влияние параметров доменной плавки на результаты работы доменных печей в условиях ОАО “Уральская сталь” // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Сер. Теория и технология металлургического производства*. 2015. № 1 (16). С. 26–29.
3. Курунов И.Ф. Разработка ресурсосберегающих технологий доменной плавки на основе ее исследования и математического моделирования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М.: МИСиС, 2003. — 107 с.
4. Голубев О.В. Математическое моделирование сложных процессов доменного производства методами нелинейной динамики: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Тула: Тульский гос. ун-т, 2003. — 20 с.
5. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. — Екатеринбург: УрО РАН, 2011. — 161 с.
6. Балицевич В.О., Сараев П.В. Математическое моделирование доменного процесса // *Тенденции развития современной науки: Сб. тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого гос. технич. ун-та: в 2 частях*. — Липецк, 2017. С. 525, 526.
7. Сеницын И.Н. Фильтры Калмана и Пугачева. — М.: Логос, 2007. — 774 с.
8. Пупышев А.А., Данилова Д.А. Использование атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой для анализа материалов и продуктов черной металлургии // *Аналитика и контроль*. 2007. Т. 11. № 2–3. С. 131–181.
9. Колос М.В., Колос И.В. Методы оптимальной линейной фильтрации / Под ред. В.А. Морозова. — М.: изд-во МГТУ, 2000. — 102 с.
10. Сафронов Н.Н., Андронов В.Н., Шкодин К.К. Анализ условий восстановления кремния в доменной печи // *Сталь*. 1981. № 4. С. 24, 25.
11. Курбацкая Е.М., Смирнов А.Н., Сысоев Н.П. Динамическая модель изменения массовых долей составляющих чугуна и шлака // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2010. № 1. С. 76–78.
12. Новохатский А.М., Семенюк П.П., Шубравый В.Н. и др. Комплексный математический анализ влияния содержания железа в агломерате на колебания кремния в чугунах // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018. № 6. С. 27–35.

MATHEMATICAL SIMULATION OF BF HOT BLAST TEMPERATURE INFLUENCE ON VARIATIONS OF SILICON CONTENT IN HOT METAL

*P. P. SEMENYUK, Chief Engineer;
R. E. VELIKOTSKY, Leading Engineer of Technical Dpt, velikotsky@gmail.com;
N. A. RUMYANTSEVA, engineer of Technical Dpt
(Alchevsk Steel-works, Ukraine, Alchevsk)*

Abstract. The problem of influence of sinter production technological factors on silicon content and particularly variations of Si (ΔSi) in hot metal is actual for the up-to-date metallurgy.

Traditional methods and plans of studies of BF heat running at present are considered less precise and effective comparing with up-to-date methods of mathematical and computer simulation, since the last provide an ability to forecast and optimize numerous parameters of BF process.

A complex mathematical analysis of dependence between hot blast temperature and ΔSi by application of the universal mathematical model, specially elaborated and adapted for industrial conditions of sinter plant operation of Alchevsk steel-works was the task of the study.

Influence of hot blast temperature (X-Factor) on minimization of ΔSi (Y-Factor) studied. Complex mathematical analysis was carried out using statistical data collected during 65 months of Alchevsk steel-works blast furnace of 3000 m³ operation. Results of calculation of influence of hot blast temperature on ΔSi by application of the universal mathematical model presented. Minimization of ΔSi when optimizing hot blast temperature reached. Accuracy of calculation using the elaborated model was more 99% of actual operational statistic.

Key words: sinter production; blast furnace; hot blast temperature; silicon content in hot metal; minimization of silicon concentration variations in hot metal; universal mathematical model; complex mathematical analysis.

For citation: Semenyuk P.P., Velikotsky R.E., Rumyantseva N.A. Mathematical simulation of BF hot blast temperature influence on variations of silicon content in hot metal. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 9, pp. 25–31. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-9-25-31

REFERENCES

1. Filatov S.V., Kurunov I.F., Smirnov L.A., Kobelev V.A., Onorin O.P. Conditions of blast furnace heat with low silicon content in hot metal. *Stal'*, 2013, no. 8, pp. 7–10. (In Russ.).
2. Morozova D.A., Shapovalov A.N., Potapov M.G. Influence of blast furnace heat parameters on the results of blast furnace operation under conditions of OJSC "Ural'skaya Stal'". *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova. Ser. Teoriya i texnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*, 2015, no. 1 (16), pp. 26–29. (In Russ.).
3. Kurunov I.F. *Razrabotka resursosberegayushhix texnologij domЕННОj plavki na osnove ee issledovaniya i matematicheskogo modelirovaniya. Avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Development of resources saving technologies of the blast furnace running based on its study and mathematical simulation. Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Moscow: MISiS, 2003, 107 p. (In Russ.).
4. Golubev O.V. *Matematicheskoe modelirovanie slozhny'x processov domENNogo proizvodstva metodami nelinejnoj dinamiki. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Mathematical simulation of complicated blast furnace processes by methods of nonlinear dynamics. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Tula: Tul'skij gosudarstvenny'j universitet, 2003, 20 p. (In Russ.).
5. Dmitriev A.N. *Matematicheskoe modelirovanie domENNogo processa* [Mathematical simulation of blast furnace process]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2011, 161 p. (In Russ.).
6. Balicevich V.O., Saraev P.V. [Mathematical simulation of blast furnace process]. *Tendencii razvitiya sovremennoj nauki: Sb. tezisov dokladov nauchnoj konferencii studentov i aspirantov Lipeckogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta: v 2 chastyax* [Mathematical modeling of the domain process. Trends in the development of modern science: Proceedings of theses of the reports of the scientific conference of students and graduate students of the Lipetsk State Technical University: in 2 parts]. Lipezk, 2017, pp. 525, 526. (In Russ.).
7. Sinitsyn I.N. *Fil'try' Kalmana i Pugacheva* [Sinitsyn I.N. Kalman and Pugachev filters]. Moscow: Logos, 2007, 774 p. (In Russ.).
8. Pupy'shev A.A., Danilova D.A. Application of nuclear-emission spectrometry with induction-associated plasma for materials analysis and products of ferrous metallurgy. *Analitika i kontrol'*, 2007, vol. 11, no. 2–3, pp. 131–181. (In Russ.).
9. Kolos M.V., Kolos I.V. *Metody' optimal'noj linejnoj fil'tracii* [Methods of optimal linear filtration]. Morozov V.A. ed. Moscow: izdatel'stvo MGTU, 2000, 102 p. (In Russ.).
10. Safronov N.N., Andronov V.N., Shkodin K.K. Analysis of silicon reduction conditions in a blast furnace. *Stal'*, 1981, no. 4, pp. 24, 25. (In Russ.).
11. Kurbaczskaya E.M., Smirnov A.N., Sy'soev N.P. Dynamic model of variation of mass portions of hot metal and slag components. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2010, no. 1, pp. 76–78. (In Russ.).
12. Novokhatsky A.M., Semenyuk P.P., Shubravitsky V.N., Velikoetsky R.E., Rumyantseva N.A. Complex mathematical analysis of influence of iron content in sinter on silicon content in hot metal fluctuation. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 6, pp. 27–35. (In Russ.).