



Оригинальная статья

УДК 669.162.263

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-413-420

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2322>

АНАЛИЗ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А. В. Павлов¹, Н. А. Спирин², В. А. Бегинюк¹,
В. В. Лавров², И. А. Гурин²

¹ ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Кирова, 93)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

Аннотация. Представлена усовершенствованная сотрудниками УрФУ – ММК («Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» – ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат») балансовая модель доменного процесса. Модель в общем виде представляет собой систему детерминированных зависимостей, характеризующих тепловой, восстановительный, газодинамический, дутьевой и шлаковый режимы доменной плавки. В основу модели положен принцип натурно-математического моделирования. Предложены показатели, характеризующие свойства конечного шлака для реализации нормального шлакового режима доменной плавки (вязкость шлака в температурном интервале 1350 – 1550 °С, градиенты вязкости шлака). Градиент вязкости наряду с допустимыми при различных температурах шлака диапазонами вязкости шлака используются при моделировании шлакового режима в качестве ограничивающих факторов для диагностики шлакового режима. Выбор предельных значений каждого из диапазонов и градиента вязкости осуществляется методом экспертного оценивания. Представлена структура модели расчета параметров конечного шлака. С использованием математической модели доменного процесса выполнен анализ шлакового режима доменной плавки по фактическим показателям их работы. Установлено, что обессеривающая способность шлака используется недостаточно полно, в результате выплавляется чугун пониженного качества как по содержанию серы, так и по содержанию кремния. Изменение характеристик шлакового режима при прочих равных условиях положительно сказывается на газопроницаемости в зоне шлакообразования, повышается восстановительная способность газа и производительность доменной печи, снижается расход кокса. Представлены результаты проектных расчетов показателей работы печей ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при изменении состава загружаемых материалов. Даны рекомендации по оптимальной основности шлака. Как показали расчеты, оптимальная основность конечного шлака, обеспечивающая максимальную его жидкоподвижность, для условий работы доменных печей комбината составляет 1,04 – 1,05 для соотношения CaO/SiO₂ и 1,30 – 1,32 для соотношения (CaO + MgO)/SiO₂.

Ключевые слова: доменный процесс, шлаковый режим, математическое моделирование, анализ

Для цитирования: Павлов А.В., Спирин Н.А., Бегинюк В.А., Лавров В.В., Гурин И.А. Анализ шлакового режима доменной плавки с использованием модельных систем поддержки принятия решений // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 413–420.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-413-420>

Original article

ANALYSIS OF SLAG MODE OF BLAST FURNACE MELTING USING MODEL DECISION SUPPORT SYSTEMS

A. V. Pavlov¹, N. A. Spirin², V. A. Beginyuk¹,
V. V. Lavrov², I. A. Gurin²

¹ PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” (93 Kirova Str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russian Federation)

² Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (28 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

Abstract. The article presents a balance model of the blast furnace process improved by the researchers from UrFU and PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” (MMK). It generally represents a system of deterministic dependencies characterizing the thermal, reduction, gas dynamic, blast and slag modes of blast furnace melting. The basic principle underlying the model is full-scale mathematical modeling. Indicators characterizing the properties

of the final slag for implementation of normal slag mode of blast furnace melting (slag viscosity in the temperature range of 1350 – 1550 °C, as well as values of the slag viscosity gradients) were proposed. The slag viscosity gradient, along with the acceptable ranges of slag viscosity at different slag temperatures, are used in modeling the slag mode as limiting factors for the diagnosis of slag mode. Selection of the limit values of each of the ranges and the viscosity gradient is carried out by the method of expert evaluation. Structure of the model for calculating the parameters of the final slag is considered. Using a mathematical model of the blast furnace process, analysis of the slag mode of blast furnace melting was performed according to the actual indicators of their operation. It was established that desulfurizing ability of the slag is insufficiently used, as a result of which cast iron of reduced quality is smelted both in terms of content of sulfur and silicon. Change in characteristics of the slag mode, other things being equal, has a positive effect on gas permeability in the slag formation zone, reducing capacity of the gas and productivity of the blast furnace increase, as well as the consumption of coke decreases. The authors describe the results of design calculations of the MMK furnace performance indicators when changing the composition of loaded materials. Recommendations on the slag optimal basicity are given. Calculations showed that the optimal basicity of the final slag, which ensures its maximum liquid mobility, for operating conditions of blast furnaces of the combine is 1.04 – 1.05 for the CaO/SiO₂ ratio and 1.30 – 1.32 for the (CaO + MgO)/SiO₂ ratio.

Keywords: blast-furnace process, slag mode, mathematical modeling, analysis

For citation: Pavlov A.V., Spirin N.A., Beginyuk V.A., Lavrov V.V., Gurin I.A. Analysis of slag mode of blast furnace melting using model decision support systems. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 413–420. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-413-420>

ВВЕДЕНИЕ

Высокая конкуренция на мировом рынке чугуна и стали, повышение стоимости сырья и топлива, внутреннее ужесточение экологических требований диктуют необходимость непрерывного анализа и совершенствования технологии доменной плавки. В ситуации, когда анализ технологии с помощью проведения опытных плавков имеет труднопредсказуемые последствия и требует огромных материальных и финансовых затрат, использование модельных систем поддержки принятия решений для анализа доменной плавки и разработки рекомендаций по ее совершенствованию является единственным рациональным и научно обоснованным решением [1 – 7].

МОДЕЛЬ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

Разработанная сотрудниками УрФУ – ММК («Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» – ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат») балансовая модель доменного процесса в общем виде представляет собой систему детерминированных зависимостей, характеризующих тепловой, восстановительный, газодинамический, дутьевой и шлаковый режимы доменной плавки. Основные расчетные соотношения и примеры реализации этой модели подробно описаны в работах [2 – 4]. В основе модели лежит натурно-модельный подход и натурно-математическое моделирование. В соответствии с этим подходом модель условно разделяется на две части: модель базового состояния и прогнозирующую модель. Модель базового состояния оценивает ход доменного процесса по имеющимся усредненным показателям за прошедший (базовый) период работы доменной печи. При этом используется информация о значениях как входных (характеристики дутья, состав и свойства загружаемой шихты и другие), так и выходных (состав жидких продуктов плавки, характеристики колошникового газа и другие) параметров. На основе результатов, которые получены с помощью этой модели, прогнози-

рующая модель дает возможность оценивать показатели доменного процесса при изменении состава и свойств загружаемых в печь агломерата, окатышей, кокса, флюсующих добавок и характеристик дутья.

Моделирование свойств конечного шлака включает следующие расчетные блоки [2 – 4, 8]:

- определение выхода, состава и вида политермы вязкости конечного шлака;
- расчет десульфурирующей способности шлака и содержания серы в чугуне;
- диагностика шлакового режима.

Структура модели расчета параметров конечного шлака приведена на рис. 1. При расчете политерм вязкости конечного шлака использована трехкомпонентная шлаковая система CaO–SiO₂–Al₂O₃. Учтено влияние на вязкость шлака оксидов MgO и TiO₂ [9 – 16].

Балансовая модель доменного процесса позволяет определять важнейшие свойства конечного шлака для реализации нормального шлакового режима плавки. Рассчитываются вязкости шлака в температурном интервале 1350 – 1550 °C, а также значения градиентов вязкости шлака:

- градиент 1 вязкости шлака показывает скорость изменения вязкости шлака в диапазоне от 0,7 до 2,5 Па·с при изменении температуры на 1 °C:

$$\Delta\eta_{0,7}^{2,5} = \frac{2,5 - 0,7}{t_{\text{шл}}^{0,7} - t_{\text{шл}}^{2,5}}, \quad (1)$$

- градиент 2 вязкости шлака показывает скорость изменения вязкости шлака при изменении температуры шлака на 1 °C в диапазоне от 1400 до 1500 °C:

$$\Delta\eta_{1400}^{1500} = \frac{\eta_{1400} - \eta_{1500}}{1500 - 1400}, \quad (2)$$

где $\Delta\eta$ – градиент вязкости шлака, Па·с/°C; $t_{\text{шл}}^{0,7}$ и $t_{\text{шл}}^{2,5}$ – температура шлака, °C, при которой вязкость шлака составляет 0,7 и 2,5 Па·с.

Градиент вязкости 1 показывает, как быстро шлак теряет свою подвижность в области низких температур.

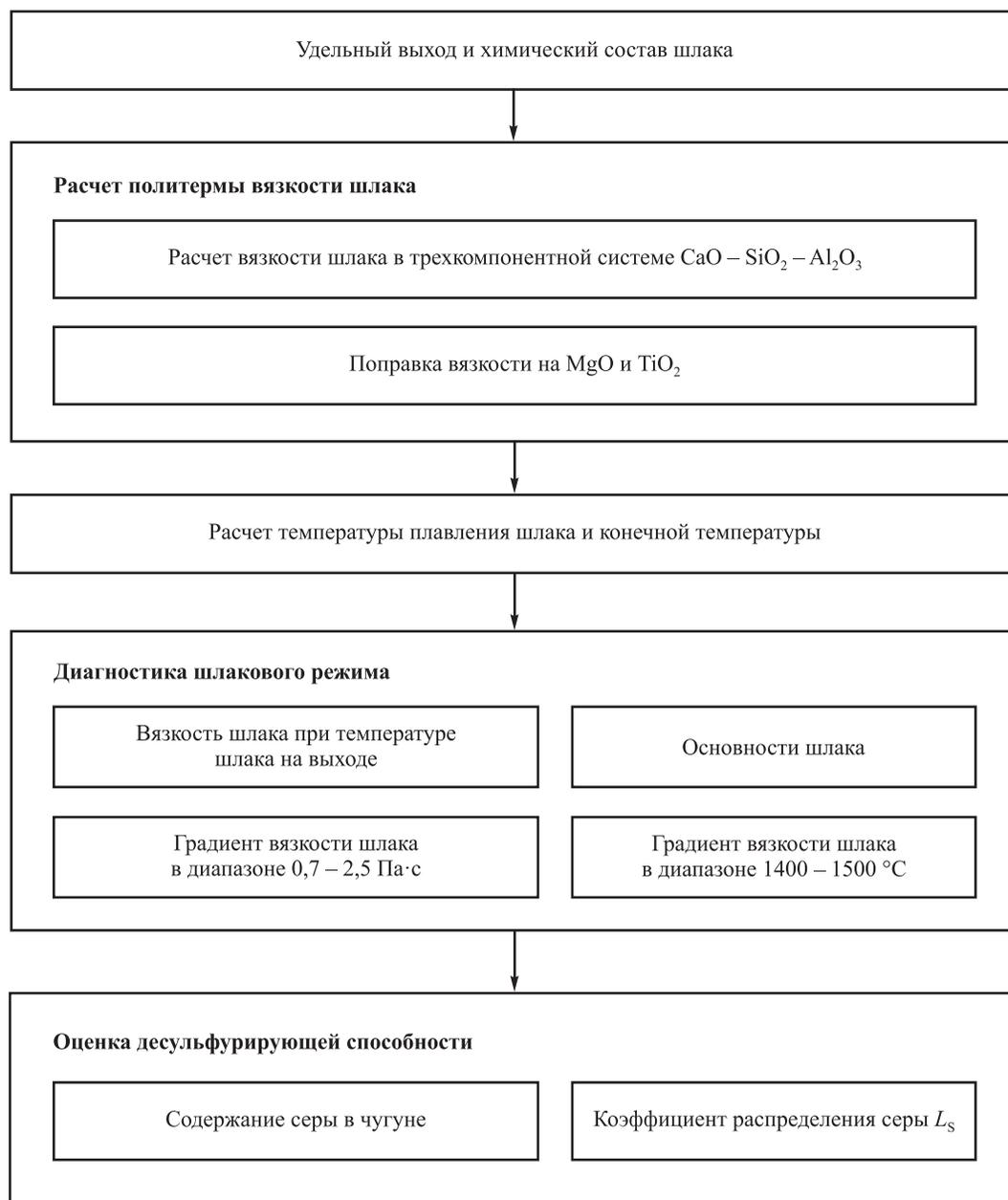


Рис. 1. Структура модели расчета параметров конечного шлака

Fig. 1. Structure of the model for calculating parameters of the final slag

По значению этого градиента вязкости можно судить, является шлак «коротким» или «длинным». По градиенту вязкости 2 определяют устойчивость шлака в области рабочих температур горна доменной печи.

Градиенты вязкости 1 и 2 совместно со значениями вязкости шлака при различных температурах используются при моделировании шлакового режима доменной печи для диагностики шлакового режима. Подбор минимальных и максимальных значений каждого параметра осуществляется методом экспертного оценивания. В табл. 1 обобщены данные о характеристике шлаков для условий доменных печей ММК при различных значениях вязкости и градиентов вязкости.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исходные данные для базового периода работы и расчетные для проектного периода 1 приведены в табл. 2. Расчет показателей доменной плавки для проектного периода 1 выполнен при том же составе и расходах железорудного сырья и кокса, при тех же текущих простоях и характеристиках дутья, но без учета расхода флюсов (из шихты выведено 6,5 кг/т чугуна кварцита). Расчетная производительность печи за счет снижения выхода шлака и содержания кремния в чугуне выросла на 237 т/сутки, а удельный расход кокса снизился на 3,7 кг/т чугуна в результате влияния тех же факторов.

Таблица 1

Характеристика конечных шлаков при различных значениях вязкости и градиентов вязкости

Table 1. Characterization of the final slags at different values of viscosity and viscosity gradients

Вязкость шлака	Характеристика шлака
$\eta_{1450} < 0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$	Шлак характеризуется малой вязкостью, обладает высокой агрессивностью к огнеупорной кладке и разрушает гарнисаж
$0,20 \leq \eta_{1450} \leq 0,55 \text{ Па}\cdot\text{с}$	Нормальная вязкость шлака, обладает хорошей обессеривающей способностью
$0,55 < \eta_{1450} < 0,65 \text{ Па}\cdot\text{с}$	Повышенная вязкость в диапазоне температур 1400 – 1500 °С
$\eta_{1450} \geq 0,65 \text{ Па}\cdot\text{с}$	Вязкость шлака в области рабочих температур превышает допустимые пределы для нормального режима плавки
$\Delta\eta_{0,7}^{2,5} > 0,035 \text{ Па}\cdot\text{с}/^\circ\text{C}$	Шлак относится к типу «коротких»; возможно загромождение горна печи и режим нормальной ее работы затруднен
$\Delta\eta_{1400}^{1500} > 0,0085 \text{ Па}\cdot\text{с}/^\circ\text{C}$	Шлак неустойчив в области рабочих температур 1400 – 1500 °С; возможно застывание шлака в желобах

Таблица 2

Параметры доменной плавки в рассматриваемые периоды

Table 2. Parameters of blast-furnace melting in the considered periods

Технологический показатель	Рассматриваемый период	
	Базовый	Проектный I
Производство среднесуточное, т/сутки	28 126	28 363
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	428,6	424,9
Текущие простои, %	1,009	1,009
Удельный выход шлака (фактический), кг/т чугуна	329,6	н/д
Выход шлака, рассчитанный по балансу шлакообразующих, кг/т чугуна	318,5	312,7
Вынос пыли (уловленной), кг/т чугуна	18,4	18,4
Давление дутья, атм/МПа	2,54/0,359	2,54/0,359
Температура дутья, °С	1135,6	1135,6
Влажность дутья, г/м ³	3,15	3,15
Содержание кислорода в дутье, %	26,64	26,64
Удельный расход природного газа, м ³ /т чугуна	100,5	100,5
Химический состав чугуна, %:		
Si	0,753	0,700
S	0,021	0,016
Mn	0,305	0,305
C	4,65	4,65
P	0,06	0,06
Ti	0,071	0,071
Химический состав шлака, %:		
CaO	37,66	38,39
SiO ₂	37,85	36,80
Al ₂ O ₃	11,40	11,57
MgO	8,55	8,75

Так как в реальных условиях работы имеют место колебания основности железорудного сырья, то это вызывает и колебания основности шлака, поэтому также выполнен расчет шлакового режима для тех же самых условий, но при увеличении основности агломерата $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ с 1,72 до 1,82 (проектный период 2).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов основных характеристик конечного шлака в рассматриваемые периоды приведены в табл. 3.

Анализ этих данных показывает следующее:

– состав конечного шлака в проектных периодах изменился; в проектном периоде 1 основность $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ повысилась с 0,995 до 1,043, основность $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$ – с 1,221 до 1,281 и $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$ – с 0,939 до 0,974; полученный в результате изменения основности агломерата (проектный 2) конечный шлак имеет следующие

характеристики: основность $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$, $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$ и

$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$ составляет 1,090, 1,325 и 1,010 соответственно;

– наблюдается повышение качества чугуна за счет

роста коэффициента распределения серы (L_S) с 37,0 до 47,7 в проектном периоде 1 и до 57,7 в проектном периоде 2; согласно расчету это позволило прогнозировать снижение содержания серы в чугуне до 0,017 % (проект 1) и 0,012 % (проект 2);

– улучшение обессеривающей способности шлака достигнуто за счет снижения вязкости шлака при температурах 1500 и 1550 °C на 0,062 и 0,046 Па·с в проектном периоде 1, на 0,096 и 0,070 Па·с в проектном периоде 2; вязкость при 1450 °C снизилась на 0,082 Па·с в проектном периоде 1 и на 0,13 Па·с в проектном периоде 2; при этом градиент вязкости l повысился незначительно (с 0,0184 до 0,0252 и до 0,0254 Па·с/°C) в проектном периоде 1 и 2, то есть ниже максимального допустимого значения 0,035 Па·с/°C.

Изменение характеристик шлакового режима при прочих равных условиях положительно сказывается на

Таблица 3

Основные характеристики конечного шлака в рассматриваемые периоды

Table 3. Main characteristics of the final slag in the considered periods

Показатель	Период			Изменение к базовому периоду	
	Базовый	Проект 1	Проект 2	Проект 1	Проект 2
$\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$, ед.	0,995	1,043	1,090	0,048	0,095
$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$, ед.	1,221	1,281	1,325	0,060	0,104
$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$, ед.	0,939	0,974	1,010	0,035	0,071
Температура шлака, °C	1524,6	1517,7	1518,0	-6,9	-6,6
Температура шлака (при 2,5 Па·с), °C	1312,1	1318,8	1319,0	6,7	6,9
Вязкость шлака, Па·с:					
при температуре шлака	0,295	0,220	0,220	-0,074	-0,075
при 1400 °C	0,777	0,614	0,614	-0,163	-0,163
при 1450 °C	0,488	0,406	0,358	-0,082	-0,130
при 1500 °C	0,341	0,279	0,245	-0,062	-0,096
при 1550 °C	0,258	0,212	0,188	-0,046	-0,070
Приход серы, кг/т чугуна	2,97	2,94	2,94	-0,03	-0,03
Коэффициент распределения серы, ед.	37,0	47,7	57,7	10,7	20,7
Содержание серы в чугуне, %	0,021	0,017	0,012	-0,004	-0,009
Температура шлака (при 0,7 Па·с), °C	1410	1390	1390	-20	-20
Градиент вязкости $\Delta\eta_{0,7}^{2,5}$, Па·с/°C	0,0184	0,0252	0,0254	0,0068	0,0070
Градиент вязкости $\Delta\eta_{1400}^{1500}$, Па·с/°C	0,0044	0,0034	0,0037	-0,0010	-0,0007

газопроницаемости в зоне шлакообразования, повышается восстановительная способность газа и производительность доменной печи, снижается расход кокса.

В настоящий момент времени железорудная часть доменного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» включает агломерат, который производится на собственных аглофабриках, а также железорудные окатыши, которые поставляются с Михайловского, Лебединского, Костомукшского ГОКов и Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного производственного объединения (ССГПО).

При увеличении доли окатышей ССГПО и Михайловского ГОКа в железорудной части шихты снижается содержание магнезии в конечном шлаке. Это связано с меньшим содержанием оксида MgO в железорудных окатышах в сравнении с агломератом, который производится на аглофабрике ММК. Это приводит к увеличению вязкости шлакового расплава и снижению его серопоглощительной способности [8, 17].

В связи с этим исследованы зависимости вязкости шлака от его основности при различном содержании оксида MgO с использованием данных, представленных в работах [18 – 20]. Анализ зависимостей показывает, что при увеличении содержания магнезии в шлаке до некоторого критического значения происходит резкое повышение его вязкости. При этом предельная концентрация оксида MgO в шлаке зависит от его основности $\left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}\right)$. Например, при концентрации оксида MgO в шлаке 8,0 % резкое увеличение вязкости шлака при температуре 1500 °С отмечается при $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 1,15$;

при концентрации оксида MgO в шлаке 10,0 % при $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 1,08$, при концентрации MgO в шлаке 12,0 % сильный рост вязкости отмечается при $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 1,05$,

а при установлении концентрации магнезии в шлаке 15 % – при $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 0,90$ (рис. 2, а).

Использование шлака основностью $B_2 = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$

вместо $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ при построении кривых вязкости шлака от основности шлака значительно упрощает взаимосвязь указанных параметров (рис. 2, б). Кривые вязкости шлаков с содержанием оксида MgO в шлаке 8, 10 и 12 % сливаются практически в одну. При этом резкое увеличение вязкости таких шлаков наблюдается при основности $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$ порядка 1,32. При увеличении концентрации магнезии в шлаке до 15 % критическое значение основности шлака $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$ уменьшается до значения 1,25.

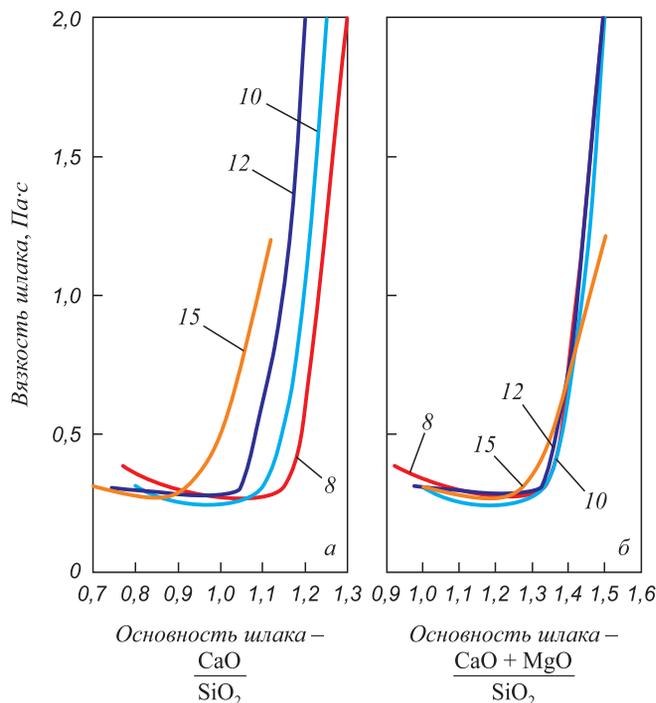


Рис. 2. Зависимость вязкости шлаков от основности шлака $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ (а) и $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$ (б) при температуре 1500 °С при разном содержании магнезии (цифры у кривых – содержание магнезии в шлаке, %)

Fig. 2. Dependence of slag viscosity on slag basicity $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ (a) and $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$ (б) at a temperature of 1500 °С with different magnesia content (the figures in the curves are magnesia content in the slag, %)

При увеличении доли окатышей в доменной шихте ММК из-за меньшего содержания оксида MgO в железорудных окатышах в сравнении с агломератом необходимо является повышение основности производимого агломерата. Получение доменного шлака с требуемым содержанием оксида MgO достигается за счет введения в аглошихту магнийсодержащих компонентов.

Выводы

Модельная система анализа шлакового режима позволяет проводить диагностику работы доменных печей на основе фактических и расчетных данных, а также решать комплекс технологических задач в прогнозном режиме. Оптимальная основность конечного шлака, обеспечивающая максимальную его жидкоподвижность, для условий работы доменных печей ММК составляет 1,04–1,05 для соотношения $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ и 1,30–1,32 для соотношения $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- 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. P. 448–454. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0516-7>
- Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирина, В.Л. Терентьев, Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, В.В. Лавров, А.В. Терентьев; под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. 301 с.
- Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирина, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 462 с.
- Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирина, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Л.Ю. Гилева, А.В. Краснобаев, В.С. Швыдкий, О.П. Онорин, К.А. Щипанов, А.А. Бурькин. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 558 с.
- Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. Киев: Наукова думка, 2007. 411 с.
- Товаровский И.Г. Доменная плавка. Днепропетровск: Пороги, 2009. 765 с.
- Гиммельфарб А.А., Котов К.И. Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах. М.: Металлургия, 1982. 328 с.
- Gordon Y., Izumskiy N. Mathematical model and stabilization system for slag mode of blast furnace operation. In: *Proceedings of AISTech-2017 Iron and Steel Technology Conf.*, Nashville, United States. 2017. Vol. 1. P. 797–805.
- Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics // *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 233. P. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065>
- Shen X., Chen M., Wang N., Wang D. Viscosity property and melt structure of CaO–MgO–SiO₂–Al₂O₃–FeO slag system // *ISIJ International*. 2019. Vol. 59. No. 1. P. 9–15. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-479>
- Zheng H., Ding Y., Zhou S., Wen Q., Jiang X., Gao Q., Shen F. Viscosity prediction model for blast furnace slag with high Al₂O₃ // *Steel Research International*. 2021. Vol. 92. No. 1. Article 1900635. <https://doi.org/10.1002/srin.201900635>
- Jiao K., Zhang J., Liu Z., Chen C. Effect of MgO/Al₂O₃ ratio on viscosity of blast furnace primary slag // *High Temperature Materials and Processes*. 2019. Vol. 38. P. 354–361. <https://doi.org/10.1515/htmp-2018-0019>
- Gan L., Lai C. A general viscosity model for molten blast furnace slag // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2014. Vol. 45. No. 3. P. 875–888. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9983-9>
- Iida T., Sakai H., Kita Y., Shigeno K. An equation for accurate prediction of the viscosities of blast furnace type slags from chemical composition // *ISIJ International*. 2000. Vol. 40. P. 110–114. https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl_s110
- Shu Q. A viscosity estimation model for molten slags in Al₂O₃–CaO–MgO–SiO₂ system // *Steel Research International*. 2009. Vol. 80. No. 2. P. 107–113. <https://doi.org/10.2374/SRI08SP085>
- Jiang D., Zhang J., Wang Z., Feng C., Jiao K., Xu R. A prediction model of blast furnace slag viscosity based on principal component analysis and k-nearest neighbor regression // *JOM*. 2020. Vol. 72. No. 11. P. 3908–3916. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04360-9>
- Pavlov A.V., Onorin O.P., Spirin N.A., Polinov A.A. MMK blast furnace operation with a high proportion of pellets in a charge. Part 1 // *Metallurgist*. 2016. Vol. 60. No. 5-6. P. 581–588. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0335-2>
- Атлас шлаков / Перевод с немецкого Г.И. Жмойдина; под ред. И.С. Куликова. М.: Металлургия, 1985. 208 с.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0516-7>
- Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L., Gileva L.Yu., Rybolovlev V.Yu., Kosachenko I.E., Lavrov V.V., Terent'ev A.V. *Computer Methods of Blast-Furnace Process Modeling*. Spirin N.A. ed. Yekaterinburg: UGTU–UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
- Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P., Kosachenko I.E. *Model Decision Support Systems in APCs of Blast Furnace Melting: Monograph*. Yekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).
- Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Gileva L.Yu., Krasnobaev A.V., Shvydkii V.S., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Burykin A.A. *Mathematical Modeling of Metallurgical Processes in APCs*. Yekaterinburg: UrFU, 2014, 558 p. (In Russ.).
- BoI'shakov V.I. *Technology of Highly Efficient Energy-Saving Blast Furnace Melting*. Kiev: Naukova dumka, 2007, 411 p. (In Russ.).
- Tovarovskii I.G. *Blast Furnace Melting*. Dnepropetrovsk: Porogi, 2009, 765 p. (In Russ.).
- Gimmel'farb A.A., Kotov K.I. *Processes of Reduction and Slag Formation in Blast Furnaces*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 328 p. (In Russ.).
- Gordon Y., Izumskiy N. Mathematical model and stabilization system for slag mode of blast furnace operation. In: *Proceedings of AISTech-2017 Iron and Steel Technology Conf.*, Nashville, United States. 2017, vol. 1, pp. 797–805.
- Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*. 2019, vol. 233, pp. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065>
- Shen X., Chen M., Wang N., Wang D. Viscosity property and melt structure of CaO–MgO–SiO₂–Al₂O₃–FeO slag system. *ISIJ International*. 2019, vol. 59, no. 1, pp. 9–15. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-479>
- Zheng H., Ding Y., Zhou S., Wen Q., Jiang X., Gao Q., Shen F. Viscosity prediction model for blast furnace slag with high Al₂O₃. *Steel Research International*. 2021, no. 1, article 1900635. <https://doi.org/10.1002/srin.201900635>
- Jiao K., Zhang J., Liu Z., Chen C. Effect of MgO/Al₂O₃ ratio on viscosity of blast furnace primary slag. *High Temperature Materials and Processes*. 2019, vol. 38, pp. 354–361. <https://doi.org/10.1515/htmp-2018-0019>
- Gan L., Lai C. A general viscosity model for molten blast furnace slag. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2014, vol. 45, no. 3, pp. 875–888. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9983-9>
- Iida T., Sakai H., Kita Y., Shigeno K. An equation for accurate prediction of the viscosities of blast furnace type slags from chemical composition. *ISIJ International*. 2000, vol. 40, pp. 110–114. https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl_s110
- Shu Q. A viscosity estimation model for molten slags in Al₂O₃–CaO–MgO–SiO₂ system. *Steel Research International*. 2009, vol. 80, no. 2, pp. 107–113. <https://doi.org/10.2374/SRI08SP085>
- Jiang D., Zhang J., Wang Z., Feng C., Jiao K., Xu R. A prediction model of blast furnace slag viscosity based on principal component analysis and k-nearest neighbor regression. *JOM*. 2020, vol. 72, no. 11, pp. 3908–3916. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04360-9>
- Pavlov A.V., Onorin O.P., Spirin N.A., Polinov A.A. MMK blast furnace operation with a high proportion of pellets in a charge. Part 1. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 5-6, pp. 581–588. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0335-2>
- Schlackenatlas*. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Verlag Stahleisen, 1981, 282 p. (Russ. ed.: *Atlas shlakov. Sprav.* Moscow: Metallurgiya, 1985, 208 p.).

- | | |
|---|---|
| <p>19. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевиц А.Г. Свойства жидких доменных шлаков. М.: Металлургия, 1975. 182 с.</p> <p>20. Жило Н.Л. Формирование и свойства доменных шлаков. М.: Металлургия, 1974. 120 с.</p> | <p>19. Voskoboinikov V.G., Dunaev N.E., Mikhalevich A.G. <i>Properties of Liquid Blast Furnace Slags</i>. Moscow: Metallurgiya, 1975, 182 p. (In Russ.).</p> <p>20. Zhilo N.L. <i>Formation and Properties of Blast Furnace Slags</i>. Moscow: Metallurgiya, 1974, 120 p. (In Russ.).</p> |
|---|---|

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Владимирович Павлов, к.т.н., начальник доменного цеха, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
E-mail: pavlov.av@mmk.ru

Aleksandr V. Pavlov, *Cand. Sci. (Eng.)*, Chief of Blast-Furnace Shop, PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”
E-mail: pavlov.av@mmk.ru

Николай Александрович Спиринов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0001-6582-3428
E-mail: n.a.spirin@urfu.ru

Nikolai A. Spirin, *Dr. Sci. (Eng.)*, Prof., Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0001-6582-3428
E-mail: n.a.spirin@urfu.ru

Виталий Александрович Бегинюк, ведущий специалист доменного цеха, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»
E-mail: beginyuk.va@mmk.ru

Vitalii A. Beginyuk, *Leading Specialist of Blast-Furnace Shop*, PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”
E-mail: beginyuk.va@mmk.ru

Владислав Васильевич Лавров, д.т.н., профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0002-6953-5519
E-mail: v.v.lavrov@urfu.ru

Vladislav V. Lavrov, *Dr. Sci. (Eng.)*, Prof. of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0002-6953-5519
E-mail: v.v.lavrov@urfu.ru

Иван Александрович Гуринов, к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0002-4989-7029
E-mail: ivan.gurin@urfu.ru

Ivan A. Gurin, *Cand. Sci. (Eng.)*, Assist. Prof. of the Chair “Thermophysics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0002-4989-7029
E-mail: ivan.gurin@urfu.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. В. Павлов – создание идеи статьи; обоснование актуальности темы; проработка содержания основных разделов; подготовка примеров практической реализации современных информационных систем в промышленности.

A. V. Pavlov – creation of the article idea; substantiation of the topic relevance; elaboration of the content of main sections; preparation of examples of practical implementation of modern information systems in industry.

Н. А. Спиринов – создание идеи статьи; обоснование актуальности темы; подготовка концепции, развернутого плана и чернового варианта статьи; подбор библиографических ссылок; окончательная правка; подготовка заключения.

N. A. Spirin – creation of the idea of the article; substantiation of the relevance of the topic; preparation of the concept, detailed plan and draft version of the article; selection of references; final editing; preparation of the conclusion.

В. А. Бегинюк – проработка содержания основных разделов; подбор библиографических ссылок; оформление по требованиям редакции; переписка с соавторами и редакцией журнала; подготовка документов для отправки материалов статьи в редакцию.

V. A. Beginyuk – elaboration of the content of main sections; selection of references; preparation of the article documents.

В. В. Лавров – проработка содержания основных разделов; подготовка примеров практической реализации современных информационных систем в промышленности.

V. V. Lavrov – elaboration of the content of main sections; preparation of the examples of practical implementation of modern information systems in industry.

И. А. Гуринов – проработка содержания разделов, связанных с разработкой и программной реализацией современных информационных систем в металлургии; подготовка аннотации, ключевых слов; перевод на английский язык материалов статьи.

I. A. Gurin – elaboration of the content of sections related to the development and software implementation of modern information systems in metallurgy; preparation of the abstract, keywords; translation into English of the article materials.

Поступила в редакцию 22.12.2021
 После доработки 24.01.2022
 Принята к публикации 07.02.2022

Received 22.12.2021
 Revised 24.01.2022
 Accepted 07.02.2022