



УДК 669.162.263

DOI 10.17073/0368-0797-2023-2-244-252



Оригинальная статья

Original article

## ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ КОНЕЧНОГО ШЛАКА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

А. В. Павлов<sup>1</sup>, Н. А. Спири́н<sup>2</sup>, И. А. Гури́н<sup>2</sup>, В. В. Лавров<sup>2</sup>,  
В. А. Бегинюк<sup>1</sup>, А. С. Исто́мин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Кирова, 70)

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

✉ pavlov.av@mmk.ru

**Аннотация.** Рассматривается общая характеристика алгоритма прогнозирования состава конечного шлака в доменной печи в режиме реального времени. В основе алгоритма лежат фундаментальные знания о процессах, протекающих в печи, и общие закономерности переходных процессов. Алгоритм позволяет выполнять прогнозирование на текущий момент времени и за каждый час на десять часов вперед. Используются линеаризованная модель доменного процесса и натурно-математический подход. В модели учитываются динамические характеристики доменных печей по различным каналам воздействия, которые изменяются и зависят от вида воздействия, режимных параметров работы печей и свойств проплавляемого сырья. Это позволяет осуществлять настройку модели на условия функционирования объекта, учитывать при моделировании изменения состава и свойств железорудного сырья и кокса, дутьевых и режимных параметров доменной плавки. Программное обеспечение информационно-моделирующей системы прогнозирования состава и свойств конечного шлака в доменной печи в режиме реального времени разработано на языке программирования C# на базе фреймворка ASP.NET MVC с использованием кроссплатформенной программной платформы .NET 5. Веб-приложение включает следующие основные функции: визуализация изменения параметров АСУ ТП и расчетных параметров во времени; диагностика шлакового режима; моделирование переходных процессов состава и свойств шлака; прогнозирование состава и свойств шлака в режиме реального времени и история прогнозирования. Описана архитектура программного обеспечения и проиллюстрирована его работа. Проведена оценка точности и надежности результатов моделирования на основе статистических показателей. Среднеквадратичное отклонение прогнозируемой основности шлака  $\text{CaO/SiO}_2$  от измеренной на выпусках составляет 0,023, надежность прогнозирования 92 %, что указывает на удовлетворительное согласование прогнозных и фактических значений содержания отдельных компонентов в шлаке. Информационно-моделирующая система, разработанная на базе представленного алгоритма, интегрирована в информационную систему доменного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат».

**Ключевые слова:** доменная печь, конечный шлак, состав, свойства, шлакообразование, динамическая модель, прогнозирование, моделирование, программное обеспечение

**Для цитирования:** Павлов А.В., Спири́н Н.А., Гури́н И.А., Лавров В.В., Бегинюк В.А., Исто́мин А.С. Информационно-моделирующая система прогнозирования состава и свойств конечного шлака в доменной печи в режиме реального времени. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(2):244–252. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-244-252>

## INFORMATION-MODELING SYSTEM FOR PREDICTION OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF FINAL SLAG IN A BLAST FURNACE IN REAL TIME

A. V. Pavlov<sup>1</sup>, N. A. Spirin<sup>1</sup>, I. A. Gurin<sup>2</sup>, V. V. Lavrov<sup>2</sup>,  
V. A. Beginyuk<sup>1</sup>, A. S. Istomin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works (70 Kirova Str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russian Federation)

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

✉ pavlov.av@mmk.ru

**Abstract.** The article considers general characteristics of the algorithm for prediction of the composition of the final slag in a blast furnace in real time. This algorithm is based on fundamental knowledge on the processes occurring in the furnace and general laws of transient processes. It allows predicting at the current moment of time and for every hour ten hours ahead. A linearized model of the blast furnace process and a natural-mathematical approach are used. The model takes into account the dynamic characteristics of blast furnaces in various impact channels, which change and depend on the type of impact, operating parameters of the furnaces and properties of the melted raw material. This makes it possible to adjust the model to operating conditions of the object, to take into account changes in the composition and properties of iron ore and coke, blast and regime parameters of blast furnace smelting when modeling. The software of the information-modeling system for prediction of the composition and properties of the final slag in a blast furnace in real time was developed in the C# programming language based on the ASP.NET MVC framework using the .NET 5 cross-platform. The web application includes the following main functions: visualization of change APCS parameters and design parameters over time; slag mode diagnostics; modeling of transient processes of composition and properties of slag; prediction of slag composition and properties in real time and prediction history. The software architecture is described and its operation is illustrated. An assessment of the accuracy and reliability of the simulation results based on statistical indicators was carried out. The root-mean-square deviation of the predicted basicity of the CaO/SiO<sub>2</sub> slag from that measured at taps is 0.023, the prediction reliability is 92 %, which indicates a satisfactory agreement between the predicted and actual values of the content of individual components in the slag. The information modeling system developed on the basis of the presented algorithm is integrated into the information system of the blast furnace shop of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works.

**Keywords:** blast furnace, final slag, composition, properties, slag-forming processes, dynamic model, prediction, modeling, software

**For citation:** Pavlov A.V., Spirin N.A., Gurin I.A., Lavrov V.V., Beginyuk V.A., Istomin A.S. Information-modeling system for prediction of the composition and properties of final slag in a blast furnace in real time. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(2):245–252.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-245-252>

## ВВЕДЕНИЕ

Шлаковый режим доменной плавки [1; 2] в существенной степени определяет важнейшие технико-экономические показатели доменной печи (удельный расход кокса, производительность) [3 – 5]. Нестационарность доменного процесса, его сложность и пространственная распределенность [6 – 10] существенно осложняют задачу прогнозирования состава и свойств конечного шлака доменной печи в режиме реального времени [11 – 15].

## ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

Перспективным для исследования переходных процессов в доменной печи является натурно-математический подход [6; 7; 16; 17]. На его основе разработана динамическая модель доменного процесса УрФУ – ММК (Уральский федеральный университет – Магнитогорский металлургический комбинат), исследованы переходные процессы изменения содержания кремния в чугуна при изменении рудной нагрузки, расхода природного газа, температуры и влажности дутья, содержания кислорода в дутье. Разработаны алгоритмическое и программное обеспечения прогнозирования содержания кремния в чугуна в режиме реального времени [18 – 20]. Основой являются фундаментальные знания по теории и практике современного доменного процесса, закономерности процессов тепло- и массообмена, газодинамики, процессов шлакообразования. При этом широко используются математическое, алгоритмическое и программное обеспечения, разработанные ранее в УрФУ для управления доменной плавкой [6; 7; 17].

## АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ КОНЕЧНОГО ШЛАКА

Разработанный на основе этих же принципов программный модуль расчета переходных процессов состава и свойств конечного шлака в доменной печи представлен в работе [21]. Показано, что динамические характеристики доменных печей по различным каналам воздействия изменяются и зависят от вида воздействия, режимных параметров работы печей и свойств проплавляемого сырья.

Прогнозирование состава и свойств конечного шлака осуществляется в следующей последовательности.

1. Определяются средние показатели работы доменной печи за предшествующие 12 ч от текущего момента времени (базовый период). Принимается допущение, что до базового периода доменная печь находилась в стационарном установившемся состоянии. Выбор базового периода такой продолжительности обосновывается средней длительностью переходных процессов в доменной печи.

2. По усредненным данным работы печи в базовом периоде рассчитывается комплекс параметров, характеризующих состав и свойства конечного шлака [6; 7]:

– основность шихты (CaO/SiO<sub>2</sub>); (CaO + MgO)/SiO<sub>2</sub>; (CaO + MgO)/(SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ед.;

– содержание в шлаке CaO; SiO<sub>2</sub>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; MgO, %;

– основность шлака (CaO/SiO<sub>2</sub>), (CaO + MgO)/SiO<sub>2</sub> и (CaO + MgO)/(SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ед.;

– вязкость шлака при температурах 1400, 1450, 1500 °С, Па·с;

– градиент вязкости шлака в диапазоне 1400 – 1500 °С, (Па·с)/°С;

– градиент вязкости шлака в диапазоне 0,7 – 2,5 Па·с, (Па·с)/°С.

Для расчета используется вся доступная информация о работе печи (конструктивные размеры печи, удельные расходы и свойства отдельных компонентов шихты, их химический состав, характеристики комбинированного дутья, состав жидких продуктов плавки, состав колошникового газа и др.).

3. По информации базового периода рассчитываются коэффициенты передачи (состав и свойства конечного шлака) по алгоритмам, представленным в работах [6; 7], по следующим каналам воздействий (при постоянном составе чугуна):

- расход (доля) и химический состав (%) агломерата различных видов;
- расход (доля) и химический состав (%) окатышей различных видов;
- расход (кг/т чугуна) и свойства кокса, химический состав (%) золы кокса;
- расход (кг/т чугуна) и химический состав (%) каждого из видов флюсующих добавок (известняк, кварцит, конвертерный шлак, доломит и другие).

4. Выполняется расчет времени от начала загрузки до момента прихода шихты к фурмам (время одного оборота шихты) по алгоритмам, представленным в работах [19; 20].

5. Рассчитываются переходные процессы по указанным каналам воздействий. Время запаздывания при изменении свойств и расходов шихтовых материалов было принято равным времени одного оборота шихты. Остальные параметры переходного процесса рассчитываются аналогично влиянию рудной нагрузки на содержание кремния в чугуне. Алгоритм расчета представлен в работах [19 – 21].

6. Определяются средние почасовые значения всех параметров в базовом периоде работы доменной печи.

7. Рассчитываются прогнозные значения состава конечного шлака на выпусках в базовом периоде, по которым нет информации об их измеренных значениях, а также за каждый час на 10 ч вперед от текущего момента времени (прогнозный период).

Учитывая гипотезу линейности рассматриваемого объекта, реакцию системы на любую сумму  $k$  входных воздействий можно рассчитать согласно принципу суперпозиции

$$\Delta Y_l(\tau) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n [\Delta x_{ij} h_{ji}(\tau - i\Delta t)], \quad (1)$$

где  $\Delta Y_l(\tau)$  – изменение во времени параметра  $l$ , характеризующего состав шлака, %;  $n$  – количество интервалов прогнозирования, ед.;  $\Delta x_{ij}$  – приращение на  $i$ -ом интервале времени среднего часового значения  $j$ -го входного воздействия;  $h_{ji}$  – переходная функция системы параметра  $l$  по  $j$ -му каналу воздействия, %/ед.;  $\Delta t$  – период усреднения входных воздействий, ч.

Входные параметры в прогножном периоде принимаются постоянными и равными их значениям в теку-

щий момент времени. Для расчета используется информация о трех последних выпусках (базовые выпуски), для которых известен состав шлака.

Прогнозируемое содержание компоненты  $l$  состава шлака равно

$$[Y_l]^{пр}(\tau) = [Y_l]^6 + \Delta Y_l(\tau), \quad (2)$$

где  $[Y_l]^6$  – содержание компоненты  $l$  в шлаке на последних выпусках базового периода, %.

8. При прогнозировании состава шлака учитывается поправка на изменение содержания кремния в чугуне. На выпусках в базовом периоде, по которым нет информации о содержании кремния в чугуне, а также в прогножном периоде, принимается прогнозное содержание кремния в чугуне из информационной системы прогнозирования содержания в режиме реального времени [20].

9. При поступлении новой информации о входных и выходных параметрах доменной плавки в последующее время осуществляется сдвиг базового периода и формирование новых базового и прогнозного периодов.

Таким образом, осуществляется настройка модели на условия функционирования объекта с учетом изменения свойств железорудного сырья и кокса, дутьевых и режимных параметров доменной плавки.

#### ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для сравнения измеренного и прогнозируемого составов шлака используются статистические показатели, в качестве которых приняты:

- среднеквадратичное отклонение прогнозируемого состава шлака от измеряемого на выпусках

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n ([Y_l]_i^n - [Y_l]_i^{пр})^2};$$

здесь  $n$  – количество выпусков, ед.;  $[Y_l]_i^n$  – измеренное содержание компоненты  $l$  в шлаке на  $i$ -ом выпуске, %;  $[Y_l]_i^{пр}$  – прогнозируемое содержание компоненты  $l$  в шлаке на  $i$ -ом выпуске, %;

- надежность прогнозирования, определяемая как отношение количества прогнозов с абсолютной погрешностью не более 0,05 к общему количеству сделанных прогнозов.

Эти показатели позволяют оценить точность и надежность прогнозирования. Схема алгоритма прогнозирования состава и свойств конечного шлака представлена на рис. 1.

#### ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Программное обеспечение (ПО) информационно-моделирующей системы прогнозирования состава



Рис. 1. Схема алгоритма прогнозирования состава и свойств конечного шлака

Fig. 1. Scheme of algorithm for prediction of the composition and properties of the final slag

и свойств конечного шлака в доменной печи в режиме реального времени разработано на языке программирования C# на базе фреймворка ASP.NET MVC с использованием кроссплатформенной программной платформы .NET 5. Архитектура разработанного ПО в нотации С4 представлена на рис. 2.

Программное обеспечение состоит из двух контейнеров: веб-приложения и консольного приложения. Консольное приложение выполняется по расписанию и предназначено для сбора данных о параметрах технологического процесса (состав и свойства шихтовых материалов, состав и свойства жидких продуктов плавки и другие) с сервера базы данных АСУП ДЦ. Полученные и рассчитанные параметры усредняются по часам, сменам, дням, неделям, месяцам и по выпускам и сохраняются в базе данных программы.

Диаграмма контейнера веб-приложения представлена на рис. 3. Веб-приложение включает следующие основные функции: визуализация изменения параметров АСУ ТП и расчетных параметров во времени; диагностика шлакового режима; моделирование переходных процессов состава и свойств шлака; прогнозирование состава и свойств шлака в режиме реального времени и история прогнозирования.

Компонент визуализации позволяет просматривать изменение указанных пользователем параметров АСУ ТП и расчетных параметров для выбранной доменной печи за заданный период. Информация выводится в табличной форме и в виде временного графика. Фрагмент веб-страницы компонента представлен на рис. 4.

Компонент диагностики шлакового режима предназначен для расчета и анализа свойств шлака по его составу. При анализе проверяются допустимые диапазоны вязкости шлака, основностей шлака ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ),  $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$  и  $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ , градиенты вязкости шлака в диапазоне 0,7 – 2,5 Па·с и вязкости шлака в диапазоне температур 1400 – 1500 °С. По расчетным данным формируется диагностическое сообщение об оценке параметров шлакового режима [6; 7].

Компонент моделирования переходных процессов состава и свойств шлака предназначен для расчета переходных процессов всех параметров, характеризующих состав и свойства шлака по каждому из указанных ранее воздействий. Результаты расчетов переходных процессов представляются в численном и графическом видах. Фрагменты веб-страниц с результатами работы компонента при увеличении расхода кварцита на 10 кг/т чугуна представлены на рис. 5.

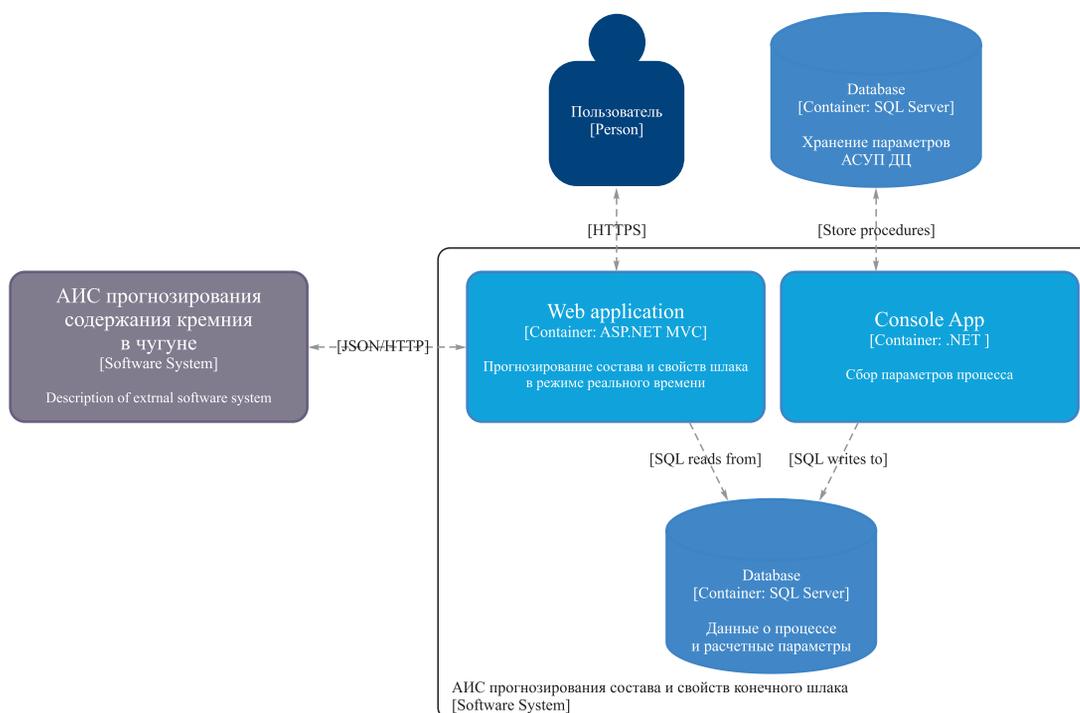


Рис. 2. Архитектура информационно-моделирующей системы прогнозирования состава и свойств конечного шлака

Fig. 2. Architecture of the information-modeling system for prediction of the composition and properties of the final slag

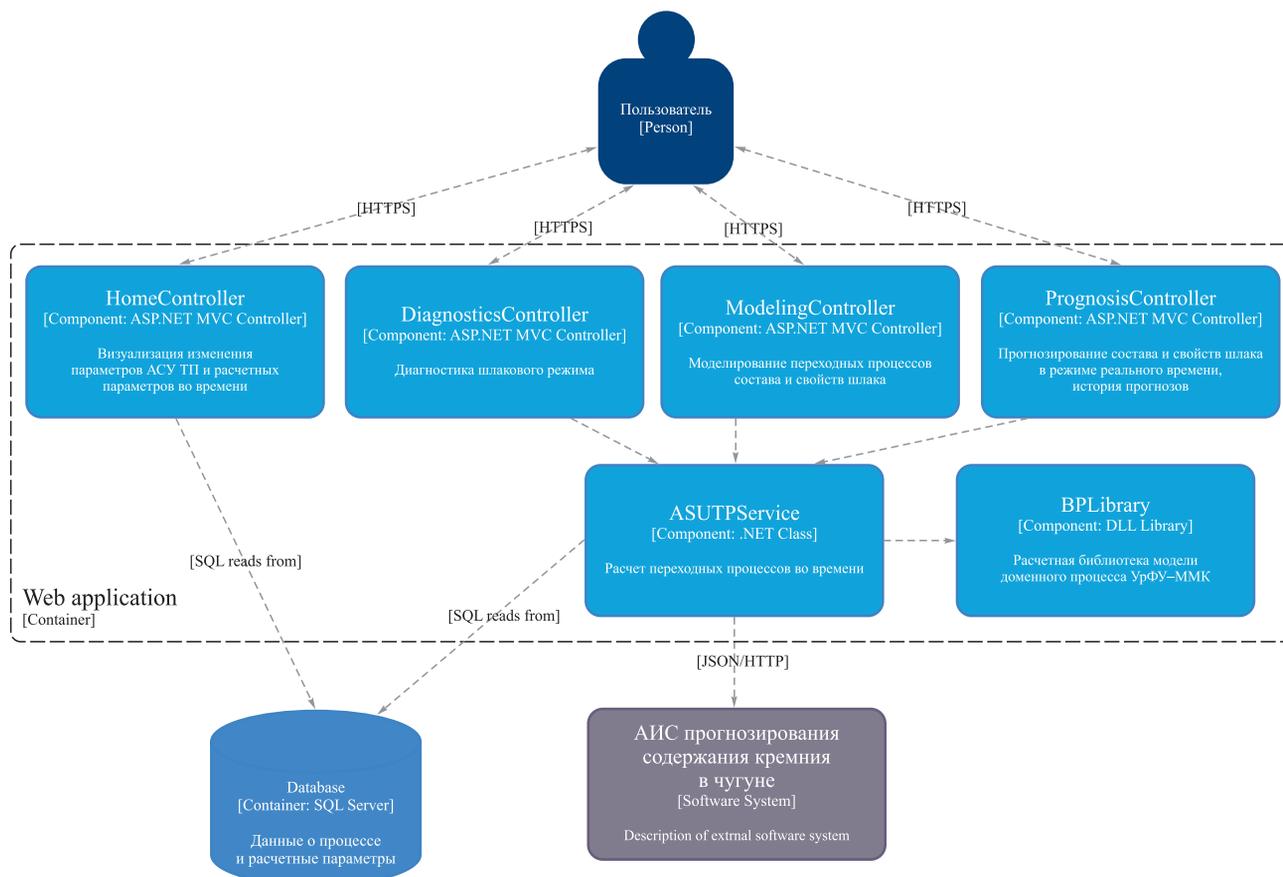


Рис. 3. Диаграмма контейнера веб-приложения в информационно-моделирующей системе прогнозирования состава и свойств конечного шлака

Fig. 3. Diagram of web application container in the information-modeling system for prediction of the composition and properties of the final slag

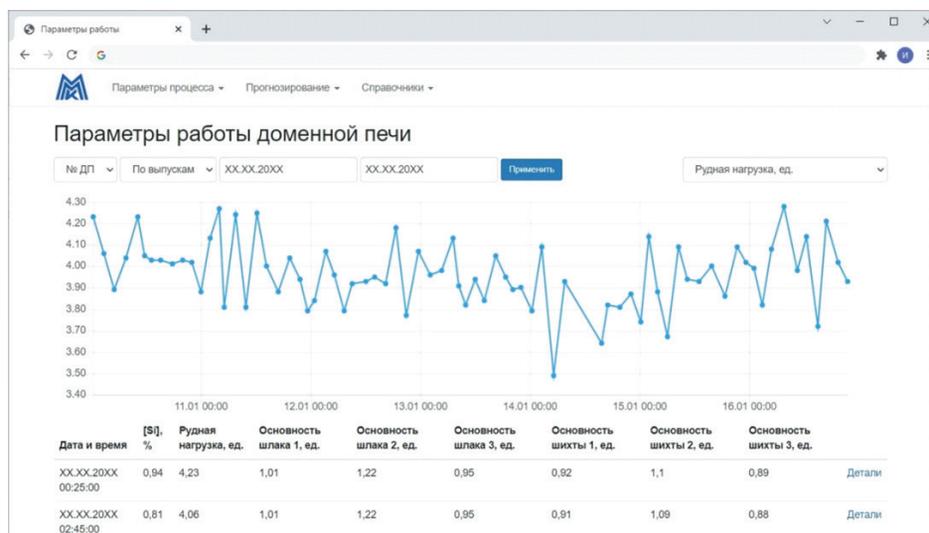
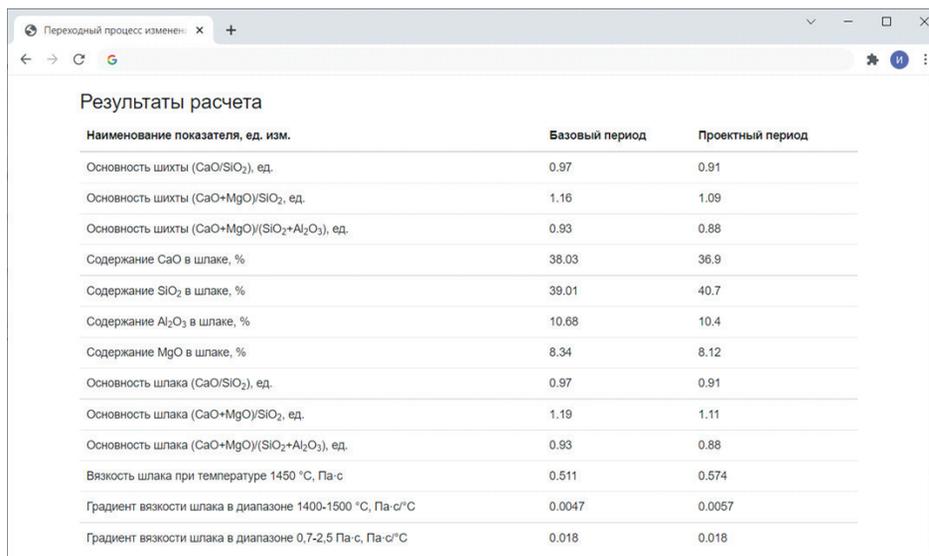
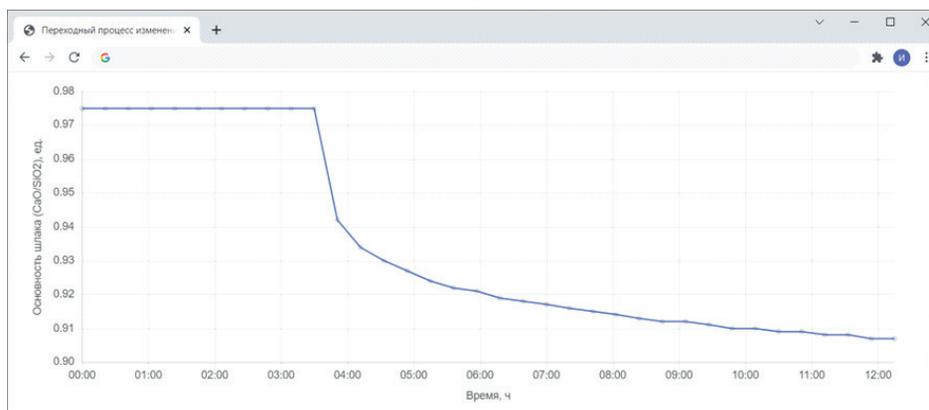


Рис. 4. Фрагмент веб-страницы визуализации изменения рудной нагрузки

Fig. 4. Fragment of a web page visualizing changes in ore load



*a*



*б*

Рис. 5. Фрагмент веб-страницы с результатами расчета состава и свойств шлака в базовом и проектном периодах (а) и график переходного процесса по основности шлака (CaO/SiO<sub>2</sub>) (б) при увеличении расхода кварцита на 10 кг/т чугуна

Fig. 5. Fragment of the web page with the results of calculating the composition and properties of slag in the base and design periods (a) and graph of the transition process for the basicity of slag (CaO/SiO<sub>2</sub>) (b) with increase in quartzite consumption by 10 kg/ton of cast iron

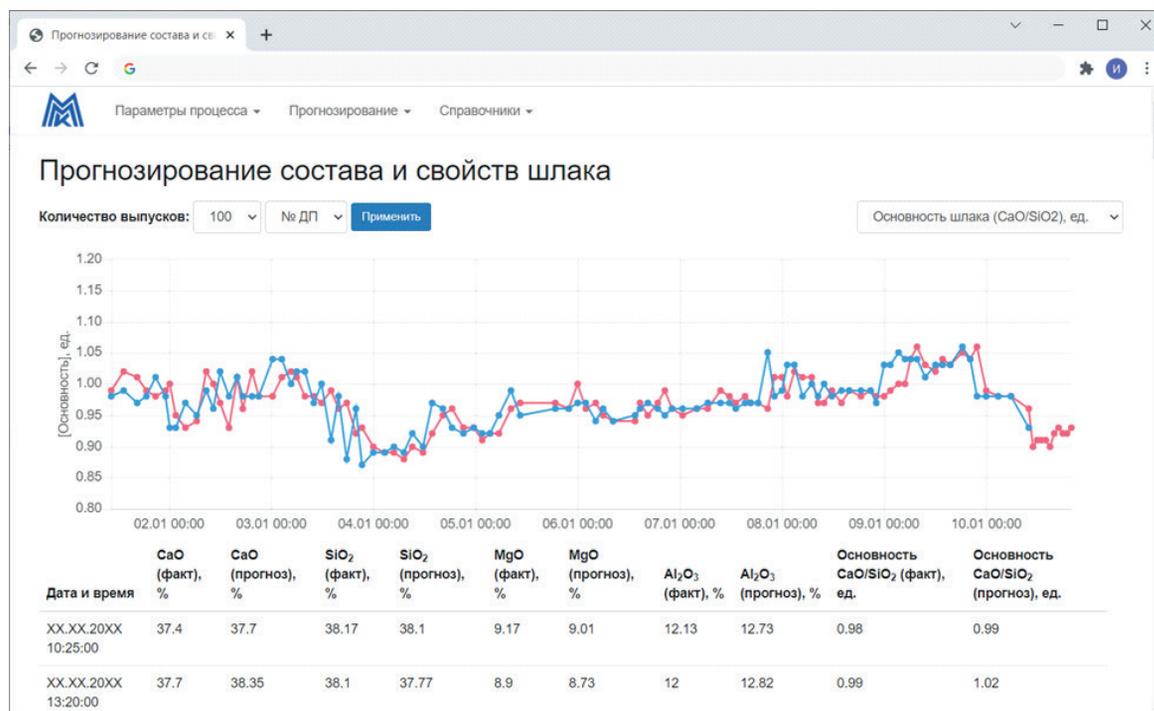


Рис. 6. Фрагмент веб-страницы «Прогнозирование состава и свойств конечного шлака»

Fig. 6. Fragment of the web page “Prediction of the final slag composition and properties”

Компонент прогнозирования предназначен не только для визуализации всех параметров, характеризующих состав и свойства шлака в режиме реального времени, но и позволяет просматривать историю прогнозируемых значений за выбранный пользователем период времени. На рис. 6 представлен фрагмент веб-страницы компонента. На нем отображается информация об измеренной (синяя линия) и прогнозируемой (красная линия) основности шлака  $\text{CaO/SiO}_2$  в графической и табличной формах, прогнозируемая основность шлака на 10 ч вперед от текущего времени.

Среднеквадратичное отклонение прогнозируемой основности шлака  $\text{CaO/SiO}_2$  от измеренной на выпусках составляет 0,023, надежность прогнозирования – 92 %, что указывает на удовлетворительное согласование прогнозных и фактических значений содержания отдельных компонентов в шлаке.

Информационно-моделирующая система позволяет прогнозировать состав и свойства конечного шлака в доменной печи в режиме реального времени и способствует принятию научно обоснованных решений по управлению шлаковым режимом доменной плавки.

## Выводы

С использованием современных технологий разработана информационно-моделирующая система прогнозирования состава и свойств конечного шлака в доменной печи в режиме реального времени. Для расчета используется вся доступная информация о работе печи

(конструктивные размеры печи, удельные расходы и свойства отдельных компонентов шихты, их химического состава, характеристики комбинированного дутья, состав жидких продуктов плавки и другие). Алгоритм прогноза построен на основе фундаментальных знаний в области теории и практики современного доменного процесса, закономерностей процессов тепло- и массообмена, газодинамики, процессов шлакообразования. Применение линеаризованной модели доменного процесса и натурно-математического подхода позволяет осуществлять настройку модели на условия функционирования объекта, учитывать при моделировании изменения состава и свойств железорудного сырья и кокса, дутьевых и режимных параметров доменной плавки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Товаровский И.Г. *Доменная плавка*. Днепропетровск: Пороги; 2009:768.  
Tovarovskii I.G. *Blast Furnace Smelting*. Dnepropetrovsk: Porogi; 2009:768. (In Russ.).
2. Бабарыкин Н.Н. *Теория и технология доменного процесса*. Магнитогорск: МГТУ; 2009:257.  
Babarykin N.N. *Theory and Technology of Blast Furnace Process*. Magnitogorsk: MSTU; 2009:257. (In Russ.).
3. *Металлургия чугуна* / Е.Ф. Вегман., Б.Н. Жеребин., А.Н. Похвиснев., Ю.С. Юсфин, И.Ф. Курунов., А.Е. Пареньков, П.И. Черноусов / Под ред. Ю.С. Юсфина. Москва: Академкнига; 2004:774.  
Vegman E.F., Zherebin N.F., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kurunov I.F., Paren'kov A.E., Chernousov P.I. *Iron Metal-*

- lurgy. Yusfin Yu.S. ed. Moscow: Akademkniga; 2004:774. (In Russ.).
4. *Современный доменный процесс* / М. Геердес, Р. Ченьо, И. Курнов, О. Лигарди, Д. Рикетс. Москва: Metallurgizdat; 2016:280.  
Geerdes M., Chen'o R., Kurnov I., Ligardi O., Rikets D. *Modern Blast Furnace Process*. Moscow: Metallurgizdat; 2016:280. (In Russ.).
  5. Большаков В.И. *Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки*. Киев: Наукова думка; 2007:412.  
Bol'shakov V.I. *High-Efficiency Energy-Saving Technology of Blast Furnace Smelting*. Kiev: Naukova Dumka; 2007: 412. (In Russ.).
  6. *Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП* / Н.А. Спири́н, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Л.Ю. Гилева, А.В. Краснобаев, В.С. Швыдкий, О.П. Онорин, К.А. Щипанов, А.А. Бурькин / Под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: изд. УрФУ; 2014:558.  
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 Automated Process Control Systems*. Yekaterinburg: UrFU; 2014:558. (In Russ.).
  7. *Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки* / Н.А. Спири́н, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко. Екатеринбург: изд. УрФУ; 2011:462.  
Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P., Kosachenko I.E. *Model Decision Support Systems in Blast Furnace Smelting Process Control Systems*. Yekaterinburg: UrFU; 2011:462. (In Russ.).
  8. Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO<sub>2</sub>/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*. 2019;233:155–162.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065>
  9. Shen X., Chen M., Wang N., Wang D. Viscosity property and melt structure of CaO–MgO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–FeO slag system. *ISIJ International*. 2019;59(1):9–15.  
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-479>
  10. Zheng H., Ding Y., Zhou S., Wen Q., Jiang X., Gao Q., Shen F. Viscosity prediction model for blast furnace slag with high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Steel Research International*. 2021;92(1): 1900635. <https://doi.org/10.1002/srin.201900635>
  11. Jiao K., Zhang J., Liu Z., Chen C. Effect of MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio on viscosity of blast furnace primary slag. *High Temperature Materials and Processes*. 2019;38:354–361.  
<https://doi.org/10.1515/htmp-2018-0019>
  12. 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; 45(3):875–888. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9983-9>
  13. 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;40: 110–114. [https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl\\_s110](https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl_s110)
  14. Shu Q. A viscosity estimation model for molten slags in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO–MgO–SiO<sub>2</sub> system. *Steel Research International*. 2009;80(2):107–113.  
<https://doi.org/10.2374/SRI08SP085>
  15. 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;72(11):3908–3916.  
<https://doi.org/10.1007/s11837-020-04360-9>
  16. *Теория и практика прогнозирования в системах управления* / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев, А.С. Рыков, В.Ф. Евтушенко, С.М. Кулаков, Н.Ф. Бондарь. Кемерово: Кузбассвузиздат-АСТШ; Москва: Российские университеты; 2008:486.  
Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyayev L.P., Rykov A.S., Evtushenko V.F., Kulakov S.M., Bondar' N.F. *Theory and Practice of Prediction in Control Systems*. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat-ASTSh; Moscow: Russian Universities; 2008: 486. (In Russ.).
  17. Спири́н Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гури́н И.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(8):588–598.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>  
Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shneider D.A., Krasnobaev A.V., Gurin I.A. Digital transformation of pyrometallurgical technologies: State, scientific problems and prospects of development. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(8):588–598. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>
  18. 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; 61(5-6):448–454.  
<https://doi.org/10.1007/s11015-017-0516-7>
  19. Onorin O.P., Spirin N.A., Istomin A.S., Lavrov V.V., Pavlov A.V. Features of blast furnace transient processes. *Metallurgist*. 2017;61(1-2):121–126.  
<https://doi.org/10.1007/s11015-017-0464-2>
  20. Spirin N.A., Polinov A.A., Gurin I.A., Beginyuk V.A., Pishnograev S.N., Istomin A.S. Information system for real-time prediction of the silicon content of iron in a blast furnace. *Metallurgist*. 2020;63(9-10):898–905.  
<https://doi.org/10.1007/s11015-020-00907-y>
  21. Spirin N.A., Lavrov V.V., Gurin I.A., Istomin A.S., Shchipanov K.A. Transient fluctuations in the composition and properties of blast-furnace slag. *Steel in Translation*. 2022;52(4): 434–438. <https://doi.org/10.3103/S0967091222040131>

## 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

**Николай Александрович Спири́н**, 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

**Иван Александрович Гури́н**, 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

**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

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

**Александр Сергеевич Истомин**, к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
ORCID: 0000-0001-9987-2201  
E-mail: as.istomin@urfu.ru

**Aleksandr V. Pavlov**, Cand. Sci. (Eng.), Chief of Blast-Furnace Shop, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works  
E-mail: pavlov.av@mmk.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

**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

**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

**Vitalii A. Beginyuk**, Leading Specialist of Blast-Furnace Shop, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works  
E-mail: beginyuk.va@mmk.ru

**Aleksandr S. Istomin**, Cand. 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: 0000-0001-9987-2201  
E-mail: as.istomin@urfu.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**А. В. Павлов** – обсуждение идеи статьи; обоснование актуальности темы; рекомендации по практическому представлению производственных данных и выбор характерных периодов работы доменных печей из практики работы доменного цеха; обобщения практического опыта применения системы в доменном цехе ПАО «ММК»; правка текста.

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

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

**В. В. Лавров** – 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.

**В. А. Бегинюк** – проработка содержания основных разделов; подготовка примеров практической реализации системы в доменном цехе ПАО «ММК».

**А. С. Истомин** – проработка содержания основных разделов; представление результатов практической реализации системы.

**A. V. Pavlov** – discussion of the article idea; substantiation of the topic relevance; recommendations for the practical presentation of production data and the choice of characteristic periods of operation of blast furnaces from the practice of the blast furnace shop; generalization of practical experience of using the system in the blast furnace shop of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works; editing the text.

**N. A. Spirin** – formulation of the article idea; substantiation of the topic relevance; preparation of the concept, structure, detailed plan and draft version of the article; selection of literary data; final editing; writing the conclusions.

**I. A. Gurin** – elaboration of the content of sections related to the development and software implementation of modern information systems in metallurgy; writing the abstract and keywords; translation of the text into English.

**V. V. Lavrov** – elaboration of the content of the main sections; selection of literary data; registration according to the requirements of the editorial board.

**V. A. Beginyuk** – elaboration of the content of the main sections; preparation of examples of practical implementation of the system in the blast furnace shop of PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works.

**A. S. Istomin** – elaboration of the content of the main sections; presentation of the results of the system practical implementation.

Поступила в редакцию 01.03.2022  
После доработки 22.04.2022  
Принята к публикации 09.12.2022

Received 01.03.2022  
Revised 22.04.2022  
Accepted 09.12.2022