

УДК 669.162.263

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАСЧЕТА ЗАДУВОЧНОЙ ШИХТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ\*

**Щипанов К.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Спириин Н.А.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» (n.a.spirin@ustu.ru)

**Бурыкин А.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Косаченко И.Е.<sup>2</sup>**, ведущий специалист

**Онорин О.П.<sup>3</sup>**, к.т.н., научный сотрудник

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»  
(455002, Россия, г. Магнитогорск, Челябинская обл., ул. Кирова, 70)

<sup>3</sup> ОАО «Уральский институт металлов»  
(620219, Россия, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 14)

**Аннотация.** Представлены технологические особенности выбора шихты заполнения доменной печи. Разработанный комплекс математических моделей и программное обеспечение предназначены для расчета шихты заполнения доменной печи с регулируемым процессом шлакообразования и восстановления. При такой задувке первые порции шлакообразующих и железорудных материалов располагаются в шахте печи, и отсутствует необходимость постепенного повышения рудной нагрузки. Основные функциональные возможности программного обеспечения позволяют осуществлять следующее: ведение справочников (конструктивные характеристики доменных печей; параметры предшествующих задувок, свойства шлакообразующих и железорудных материалов, кокса и др.); расчет состава шихты заполнения и свойств чугуна и шлака при заданных пользователем расходах шлакообразующих материалов и флюсов и дутьевых параметрах; расчет оптимального состава шихты заполнения и подбор дутьевых параметров с учетом ограничений на тепловой, шлаковый, газодинамический режимы и качество получаемого чугуна; диагностику и представление результатов расчета в табличном и графическом виде, сохранение их в базе данных.

**Ключевые слова:** задувка доменной печи, дутьевой режим, газодинамика, шлакообразование, математическая модель, программное обеспечение.

Задувка доменной печи и последующий раздувочный период являются ответственными операциями, от правильного выполнения которых зависит нормальная работа печи, продолжительность ее службы, количество и длительность промежуточных ремонтов. Анализ литературы по доменному производству показал, что существуют приближенные методики расчетов задувочной шихты, основанные на практике задувки ранее введенных в эксплуатацию печей [1 – 7]. Моделирование одномерного нестационарного состояния температурных полей для задувки доменных печей выполнено зарубежными исследователями [8 – 10]. Однако, рассматриваемое направление теоретически мало изучено, отсутствуют единые научно обоснованные методы выбора состава шихты заполнения и дутьевых параметров.

При форсированной задувке (с регулируемым процессом шлакообразования и восстановления) первые порции шлакообразующих и железорудных материалов располагаются в шахте печи. При этом отсутствует не-

обходимость постепенного повышения рудной нагрузки [4 – 5, 7]. Структура математической модели расчета шихты заполнения при форсированной задувке представлена на рис. 1. Загружаемая в печь шихта делится на три части (нулевую, первую и вторую).

*Расчет «нулевой шихты»*, которая состоит только из кокса, не участвует в процессе горения и играет роль дренажной коксовой насадки. В объем нулевой шихты входит следующее: зумпф (объем горна, определяемый высотой «мертвого слоя»); объем горна от уровня чугунной летки до уровня воздушных фурм; объем кокса, заключенный в конусе неподвижных материалов от уровня воздушных фурм.

*Расчет «первой шихты»*, структура математической модели которого представлен на рис. 2.

Первая шихта делится на две части: первая порция состоит из кокса, а вторая – из кокса и шлакообразующих материалов. Последовательность выполнения расчетов по определению параметров первой шихты заключается в следующем:

– по балансу тепла определяется необходимый расход кокса для нагрева шихты и огнеупорной

\* Работа выполнена при финансовой поддержке УрФУ в рамках реализации Программы развития УрФУ для победителей конкурса «Молодые ученые УрФУ».

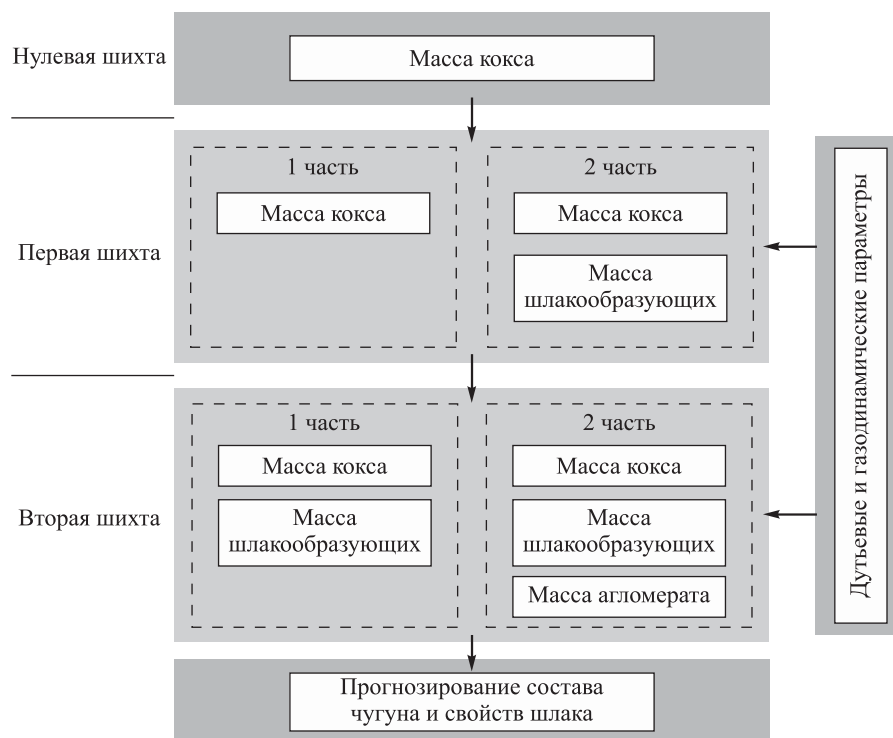


Рис. 1. Структура математической модели расчета шихты заполнения с регулируемым процессом шлакообразования и восстановления

Fig. 1. The structure of the mathematical model for calculation of the filling charge with the adjustable process of slag formation and recovery

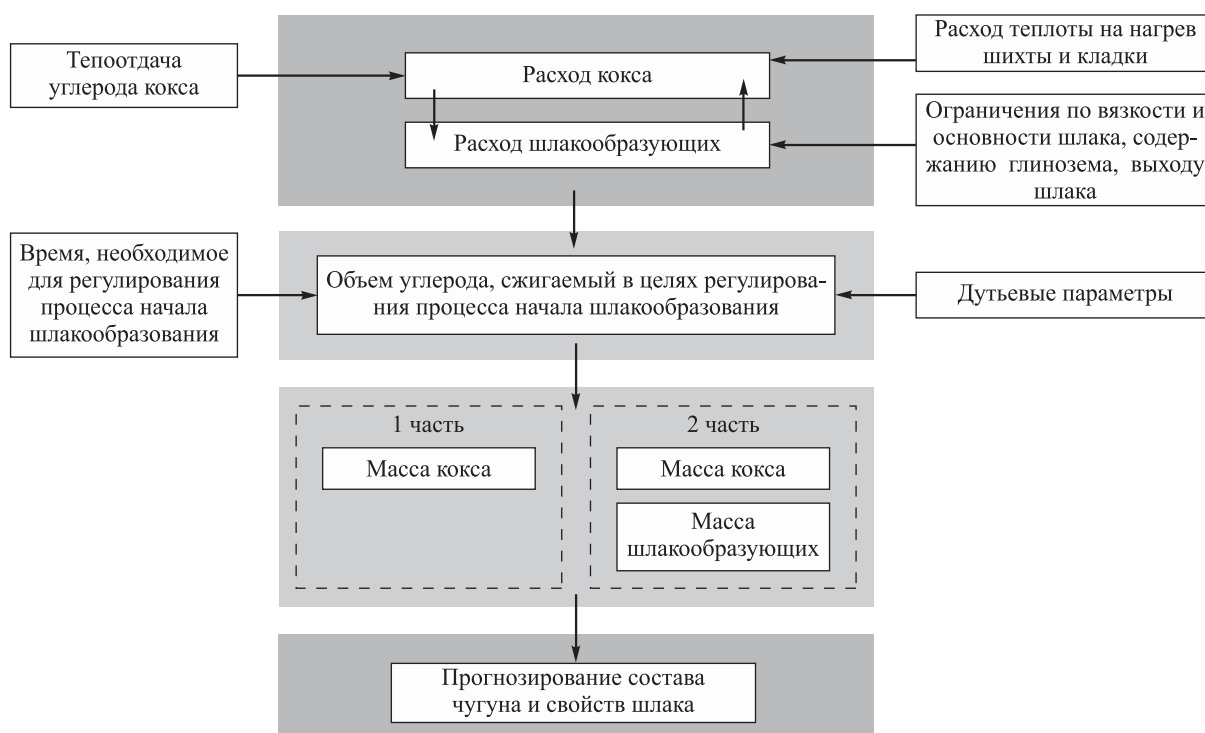


Рис. 2. Структура математической модели расчета первой шихты

Fig. 2. The structure of the mathematical model for calculation of the first charge

кладки до рабочих температур, т.е. количество тепла от сжигания массы кокса первой шихты должно быть достаточным для нагрева огнеупорной кладки и массы материалов этой шихты до

рабочих температур, характерных для нижней ступени теплообмена;  
– рассчитываются расходы шлакообразующих материалов исходя из заданного состава шлака

(CaO/SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), заданной вязкости шлака при температурах 1400 и 1500 °С; в основу расчета вязкости шлака положена математическая обработка известных шлаковых диаграмм при этих температурах;

- в связи с вводом в шихту шлакообразующих материалов возникает необходимость дополнительного расхода кокса на нагрев и плавление этих материалов; при изменившемся расходе кокса осуществляется корректировка состава шихты, поскольку при увеличенном расходе кокса меняются состав и характеристики шлака;
- далее определяется расположение первой шихты по высоте печи; ввод в первую часть первой шихты шлакообразующих материалов не предусматривается; появляющиеся при горении кокса первой шихты шлакообразующие из золы кокса распределяются в межкусовых пространствах коксовой насадки, которые не образуют жидкоподвижного шлака.

Такой метод задувки печи предполагает работу горна печи без шлака, что дает возможность осуществлять отвод горячих газов через трубы, заложенные в чугунные летки. В ином случае при раннем шлакообразовании неизбежно заливание труб шлаком, прекращение движения газа в нижней части горна, что не позволяет нагреть лещадь до температур, обеспечивающих нормальную отработку первых порций расплавов чугуна и шлака. Промышленные задувки доменных печей по технологии с задержкой шлакообразования показывают,

что время работы печи до прихода шлака в горн должно быть более 6 ч и доходить до 10 ч без опасения значительного нарушения газодинамических свойств столба шихты [4, 5]. Скорость движения шихты в печи и время подхода шлакообразующих материалов к фурмам определяются расходами дутья, природного газа, кислорода, а также влажностью дутья. После задания изменения этих параметров по ходу задувки рассчитывается количество кокса, необходимое для регулирования времени начала процесса шлакообразования.

*Расчет «второй шихты»*, структура математической модели которого представлена на рис. 3.

Вторая шихта также, как и первая, делится на две части. Первая порция состоит из кокса и шлакообразующих материалов, а вторая – из кокса, шлакообразующих и железорудных материалов.

Для определения расходов компонентов шихты в целом на вторую шихту производится ее расчет методом А.Н. Рамма [11], по которому определяются удельный расход железорудного материала и кокса на тонну чугуна, а также среднее значение рудной нагрузки. Расчет расходов шлакообразующих материалов и флюсов во второй шихте производится аналогично расчету первой шихты. Отличие заключается в том, что учитывается наличие железорудных материалов во второй части второй шихты. Расположение первых порций рудных материалов второй шихты по высоте печи имеет исключительно важное значение. Это связывается с необходимостью хорошего прогрева и полного восстановления оксидов железа рудного материала.

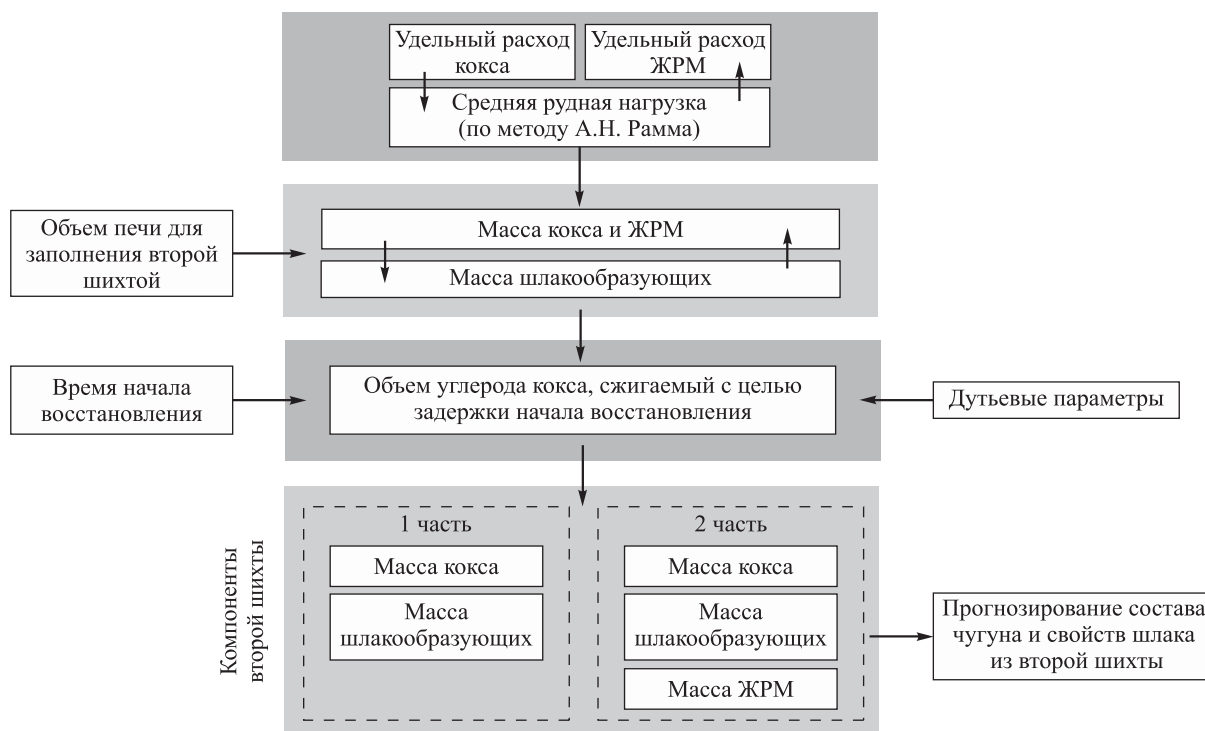


Рис. 3. Структура математической модели расчета второй шихты

Fig. 3. The structure of the mathematical model for calculation of the second charge

При малой высоте расположения железорудных материалов возможен приход в нижнюю часть печи железистого шлака, что вызовет похолодание низа печи, нарушение нормальной фильтрации расплавов в горне и сложности в отработке продуктов плавки при выпуске расплавов. Это расстояние связано со временем пребывания шихты в печи. В связи с этим в качестве настройки модели используется допустимое время прихода железорудных материалов к воздушным фурмам, и при заданном темпе задувки печи определяется горизонт заложения в шихте заполнения рудного материала. Опыт задувок доменных печей свидетельствует о том, что в начальный период задувки печи значение теоретической температуры горения должно быть на минимально возможном уровне. Это объясняется тем, что в этот момент задувки в горне печи отсутствуют потребители (рудные и шлакообразующие компоненты) тепла. Поддержание допустимой теоретической температуры горения осуществляется параметрами дутья, в частности его влажностью.

*Прогнозное содержание серы в чугуна* рассчитывается по балансу серы, который составляется из всех серосодержащих компонентов шихты, шлака и чугуна [12].

*Моделирование газодинамического режима плавки.* Следует отметить, что слой шихты заполнения отличается пониженной насыпной массой из-за большого расхода кокса в шихте и поэтому подвисяния шихты происходят при меньшем перепаде, чем это имеет место при обычной плавке. В качестве критерия устойчивости слоя шихты в печи при воздействии на него газового потока принимается степень уравнивания (СУ) шихты газом. Предельный перепад давления, превышение которого вызывает подвисяние шихты в

печи, наступает при достижении критической степени уравнивания ( $SU_{крит}$ ) шихты газом [12].

*Оптимизационная модель шихты заполнения.* Предусматривает определение состава шихты заполнения, выбора дутьевых параметров исходя из получения заданной основности ( $CaO/SiO_2$ ) шлака. При этом учитываются технологические ограничения на тепловой, дутьевой, газодинамический и шлаковый режимы плавки, которые включают следующие параметры: вязкость шлака при температурах 1400 и 1500 °С, П; содержание  $Al_2O_3$  в шлаке, %; выход шлака, т/т; содержание серы в чугуне, %; содержание кремния в чугуне, %; теоретическая температура  $t$  горения на фурмах, °С; степень уравнивания шихты газом, %.

Основные функциональные возможности программного обеспечения:

- ведение справочников (конструктивные характеристики доменных печей; параметры предшествующих задувок, свойства шлакообразующих и железорудных материалов, кокса и др.);
- расчет состава шихты заполнения и свойств чугуна и шлака при заданных пользователем расходах шлакообразующих материалов и флюсов, дутьевых параметрах;
- расчет оптимального состава шихты заполнения и подбор дутьевых параметров с учетом ограничений на тепловой, шлаковый, газодинамический режимы и качество получаемого чугуна при любых заданных комбинациях входных параметров;
- диагностика и представление результатов расчета в табличном и графическом виде, сохранение их в базе данных.

На рис. 4 показана графическая часть отчета «Расположение шихты в объеме печи». На схеме печи от-

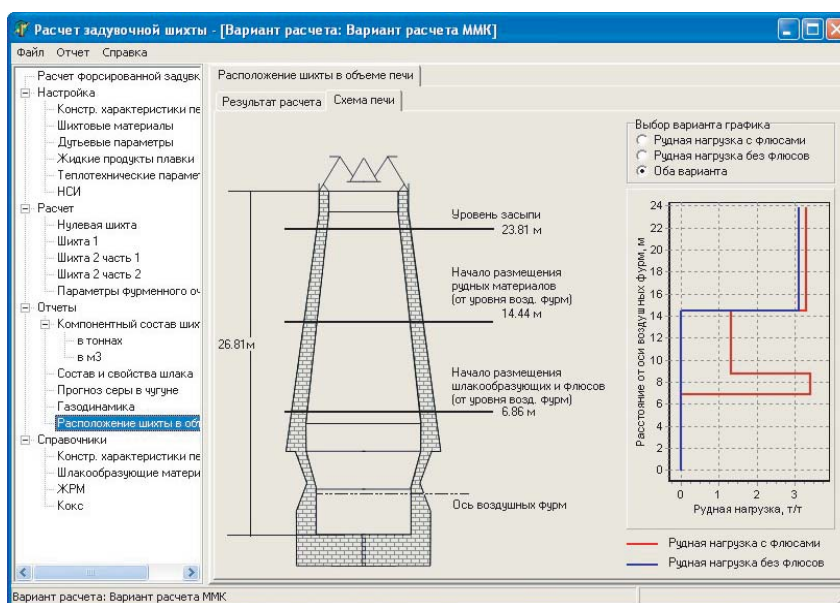


Рис. 4. Окно с отчетом «Расположение шихты в объеме печи»

Fig. 4. Report indicator “Arrangement of the charge in furnace space”

мечены уровни начала размещения шлакообразующих и рудных материалов, а также уровень засыпи. На графике справа отображается изменение рудной нагрузки (с флюсами или без них по выбору пользователя) по высоте печи от уровня воздушных фурм до уровня засыпи.

Анализ результатов расчетов позволил сформулировать общие принципы выбора состава шихты заполнения, дутьевых и газодинамических параметров:

- основность конечного шлака по отношению  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  в зависимости от содержания кремния в чугунах изменяется в интервале 0,9 – 1,0;
- средняя рудная нагрузка без флюсов и шлакообразующих составляет 0,6 – 0,7 т/т;
- рудная нагрузка в железорудной части (вторая часть второй шихты) шихты заполнения составляет 2,4 – 3,0 т/т;
- расположение материалов шихты заполнения должно соответствовать следующим принципам:
  - шлакообразующие материалы загружаются на высоте не менее 7,0 м от уровня воздушных фурм (для печей среднего и большого объемов);
  - железорудные материалы располагаются на высоте не менее 11,5 – 12,0 м от уровня фурм (для печей среднего и большого объемов);
- задувочная шихта рассчитывается на получение литейных чугунов средних марок с содержанием кремния 1,5 – 3,0 %;
- дутьевые параметры выбираются таким образом, чтобы теоретическая температура горения на фурмах в начальный период плавки шихты заполнения составляла 1850 °С, а степень уравновешивания шихты не превышала значения, равного 0,45.

**Выводы.** Разработанный комплекс математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения предназначен для расчета шихты заполнения доменной печи, ее расположения по высоте печи, выбора оптимальных дутьевых и газодинамических параме-

тров, который может быть использован при задувке с регулируемым процессом шлакообразования и восстановления. Функциональные возможности программного обеспечения позволяют оперативно решать оптимизационные задачи выбора состава шихты заполнения, дутьевого, газодинамического и шлакового режимов, исследовать влияние различных входных факторов на выбор состава шихты заполнения и дутьевых параметров.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жеребин Б.Н. Практика ведения доменной печи. – М.: Металлургия, 1980. – 248 с.
2. Волков Ю.П., Шпарбер Л.Я., Гусаров А.К. Технолог-доменщик. – М.: Металлургия, 1986. – 263 с.
3. Остроухов М.Я., Шпарбер Л.Я. Справочник мастера-доменщика. – М.: Металлургия, 1976. – 304 с.
4. Чернобривец Б.Ф., Капорулин В.В., Завидонский В.А. Практика доменного производства. – М.: Металлургия, 1992. – 111 с.
5. Капорулин В.В. Некоторые вопросы технологии задувки доменных печей // Сталь. 1989. № 6. С. 17 – 20.
6. Улахович В.А., Можаренко Н.М., Нетронин В.И. и др. Раздувка мощной доменной печи объемом 5500 // Сталь. 1988. № 1. С. 12 – 18.
7. Спири Н.А., Гибадулин М.Ф., Косаченко И.Е. и др. Расчет задувочной шихты для доменной печи с регулируемыми процессами шлакообразования и восстановления // Сталь. 2006. № 3. С. 7 – 11.
8. Fielden C.J.; Wood B.I. A dynamic digital simulation of the blast furnace // Journal of The Iron and Steel Institute. 1968. Vol. 206, pp. 650 – 658.
9. Natano M., Kurita K., Yamaoka H., Yokoi T. Investigation of blow-in operation through the blast furnace dynamic model // Tetsu-to-Hagane. 1982. Vol. 68, pp. 2369 – 2376.
10. Taguchi S., Kubo H., Tsuchiya N., Ichifuji K., Okabe K. Development of a mathematical model of silicon transfer via SIO in the blast furnace // Tetsu-to-Hagane. 1982. Vol. 68, pp. 2303 – 2310.
11. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
12. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Спири Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю. и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.

Поступила 23 июня 2014 г.

### TECHNOLOGICAL FEATURES AND SOFTWARE CALCULATIONS OF BLOWING CHARGE IN BLAST FURNACE

*Shchipanov K.A.*<sup>1</sup>, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermophysics and Computer Science in Metallurgy”*

*Spirin N.A.*<sup>1</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Thermophysics and Computer Science in Metallurgy” (n.a.spirin@ustu.ru)*

*Burykin A.A.*<sup>1</sup>, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermophysics and Computer Science in Metallurgy”*

*Kosachenko I.E.*<sup>2</sup>, *Leading Specialist*

*Onorin O.P.*<sup>3</sup>, *Cand. Sci. (Eng.), Researcher*

<sup>1</sup> *Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)*

<sup>2</sup> *JSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant” (70, Kirova str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, 455002, Russia)*

<sup>3</sup> *JSC “Ural Institute of Metals” (14, Gagarina str., Ekaterinburg, 620219, Russia)*

**Abstract.** The article presents the technological features of the charge choice for filling the blast furnace. The developed complex of mathematical models and software was designed for charge calculation to fill the blast furnace with adjustable process of slag formation and recovery. When blowing, the first portions of slag-forming and iron-ore materials were located in the furnace shaft and there was no need for

gradual improvement of the ore load. The basic functional capabilities of the software allowed the following: manual maintenance (the structural characteristics of blast furnaces; the parameters of the previous blowing-in, properties of slag-forming and iron ore materials, coke, and others); the calculation of the charge for filling and cast iron and slag properties at user-specified spending of slag-forming materials and fluxes and blast parameters; calculation of the optimal charge composition for filling and blowing selection subject to the restrictions in heat, slag, gas-dynamic regimes and the quality of the cast iron; diagnosis and presentation of calculation results in tabular and graphical forms, saving them in the database.

**Keywords:** blowing-in of a blast furnace, blasting mode, gas kinetics, slag formation, mathematical model, software.

#### REFERENCES

1. Zherebin B.N. *Praktika vedeniya domennoi pechi* [Practice of blast-furnace control]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 248 p. (In Russ.).
2. Volkov Yu.P. Shparber L.Ya., Gusarov A.K. *Tekhnolog-domenshchik* [Blast-furnace operator]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 263 p. (In Russ.).
3. Ostroukhov M.Ya., Shparber L.Ya. *Spravochnik mastera-domenshchika* [Reference book of blast-furnace operator]. Moscow: Metallurgiya, 1976. 304 p. (In Russ.).
4. Chernobrivets B.F., Kaporulin V.V., Zavidonskii V.A. *Praktika domennogo proizvodstva* [Blast-furnace practice]. Moscow: Metallurgiya, 1992. 111 p. (In Russ.).
5. Kaporulin V.V. Some matters of blowing-in technology of blast furnaces. *Stal'*. 1989, no. 6, pp. 17–20. (In Russ.).
6. Ulakhovich V.A. Mozharenko N.M. Netronin V.I., Ikkonen A.K., Kotov A.P. Blowing of a high-powered blast furnace with the capacity of 5500. *Stal'*. 1988, no. 1, pp. 12–18. (In Russ.).
7. Spirin N.A., Gibadulin M.F., Kosachenko I.E., Onorin O.P., Pavlov A.V., Rybolovlev V.Yu. Calculations of blowing-in blast-furnace charge with the regulated processes of charge formation and recovery. *Stal'*. 2006, no. 3, pp. 7–11. (In Russ.).
8. Fielden C.J., Wood B.I. A dynamic digital simulation of the blast furnace. *Journal of The Iron and Steel Institute*. 1968. Vol. 206, pp. 650–658.
9. Hatano M., Kurita K., Yamaoka H., Yokoi T. Investigation of blow-in operation through the blast furnace dynamic model. *Tetsu-to-Hagane*. 1982. Vol. 68, pp. 2369–2376.
10. Taguchi S., Kubo H., Tsuchiya N., Ichifuji K., Okabe K. Development of a mathematical model of silicon transfer via SIO in the blast furnace. *Tetsu-to-Hagane*. 1982. Vol. 68, pp. 2303–2310.
11. Ramm A.N. *Sovremennyy domennyi protsess* [Modern blast-furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1980. 304 p. (In Russ.).
12. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P., Kosachenko I.E. *Model'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenii v ASU TP domennoi plavki metallurgii* [Model support entity of decision-making in automatic process control system in blast-furnace metallurgy]. Ekaterinburg: UrFU, 2011. 462 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was supported by the Ural Federal University (UrFU) in the framework of the Development Program for UrFU winners of the contest “Young scientists of UrFU”.

Received June 23, 2013