

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 669.162.263

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДОМЕННОМ ЦЕХЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВКИ*

Н.А. Спирин, д.т.н., профессор

Л.Ю. Гилёва, к.т.н., доцент

В.В. Лавров, к.т.н., доцент

А.С. Истомин, аспирант

И.А. Гурин, студент

А.А. Бурькин, к.т.н., доцент

К.А. Щипанов, к.т.н., доцент

Уральский федеральный университет (Екатеринбург, Россия)

Аннотация. Представлена модель оптимизации распределения энергетических ресурсов в доменном цехе с учетом изменения параметров плавки. Оптимизационная модель позволяет прогнозировать параметры инжектируемого топлива на отдельных доменных печах в различных технологических ситуациях работы цеха. Использование разработанного модуля в современной информационно-моделирующей системе АСУ доменной плавки позволяет решать оперативные задачи управления технологией доменной плавки, обеспечивает повышение эффективности принятия решений инженерно-техническим персоналом в условиях изменений объема топливно-энергетических ресурсов, нестабильности состава и качества проплавленного железорудного сырья и конъюнктуры рынка.

Ключевые слова: доменное производство, оптимизация, математическое моделирование, распределение энергоресурсов, параметры плавки.

E-MAIL: n.a.spirin@ustu.ru

Цены на кокс и природный газ по прогнозам продолжают расти в ближайшей и долгосрочной перспективе. При заданном на доменный цех общем расходе этих ресурсов целесообразно иметь оперативную методику оценки эффективности использования топливно-энергетических ресурсов на отдельных доменных печах и осуществлять их оптимальное распределение. Решить эту задачу можно только при широком использовании современных методов математического моделирования и разработанных на этой основе автоматизированных систем оптимизации распределения энергоресурсов [1, 2].

Используемый подход основан на следующих положениях: при незначительных колебаниях параметров относительно базовых значений целесообразно использовать принцип малых отклонений и свести задачу оптимизации к линейному математическому программированию. Разработанная ранее модель позволяла по фактическим показателям работы отдельных доменных печей оценивать оптимальность использования природного газа при неизменных на всех доменных печах параметрах шихты, температуры и влажности горячего дутья, содержания кислорода в

дутье на уровне базового периода, что ограничивало возможность ее практического применения для прогнозных режимов работы отдельных печей и цеха в целом [3 – 6].

Оценка параметров доменной плавки и расчет коэффициентов линеаризованной модели выполнены с использованием разработанной в Уральском федеральном университете (УрФУ) в рамках концепции возмущенно-невозмущенного движения балансовой модели доменного процесса, которую условно можно разделить на две части – базового состояния и прогнозирующую [3, 7]. Модель базового (эталонного) состояния позволяет оценить состояние каждой доменной печи и влияние входных параметров на тепловой, газодинамический и шлаковый режимы доменной плавки с использованием всей фактически доступной информации о параметрах шихты, комбинированного дутья, колошниковога газа и продуктов плавки. Прогнозирующая модель на основании результатов, полученных с помощью модели базового (эталонного) состояния, позволяет оценить показатели доменного процесса в случае изменения условий плавки.

На рис. 1 представлена структура усовершенствованной модели оптимизации распределения энергоресурсов в доменном цехе при изменении параметров плавки, включающая следующие основные блоки.

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

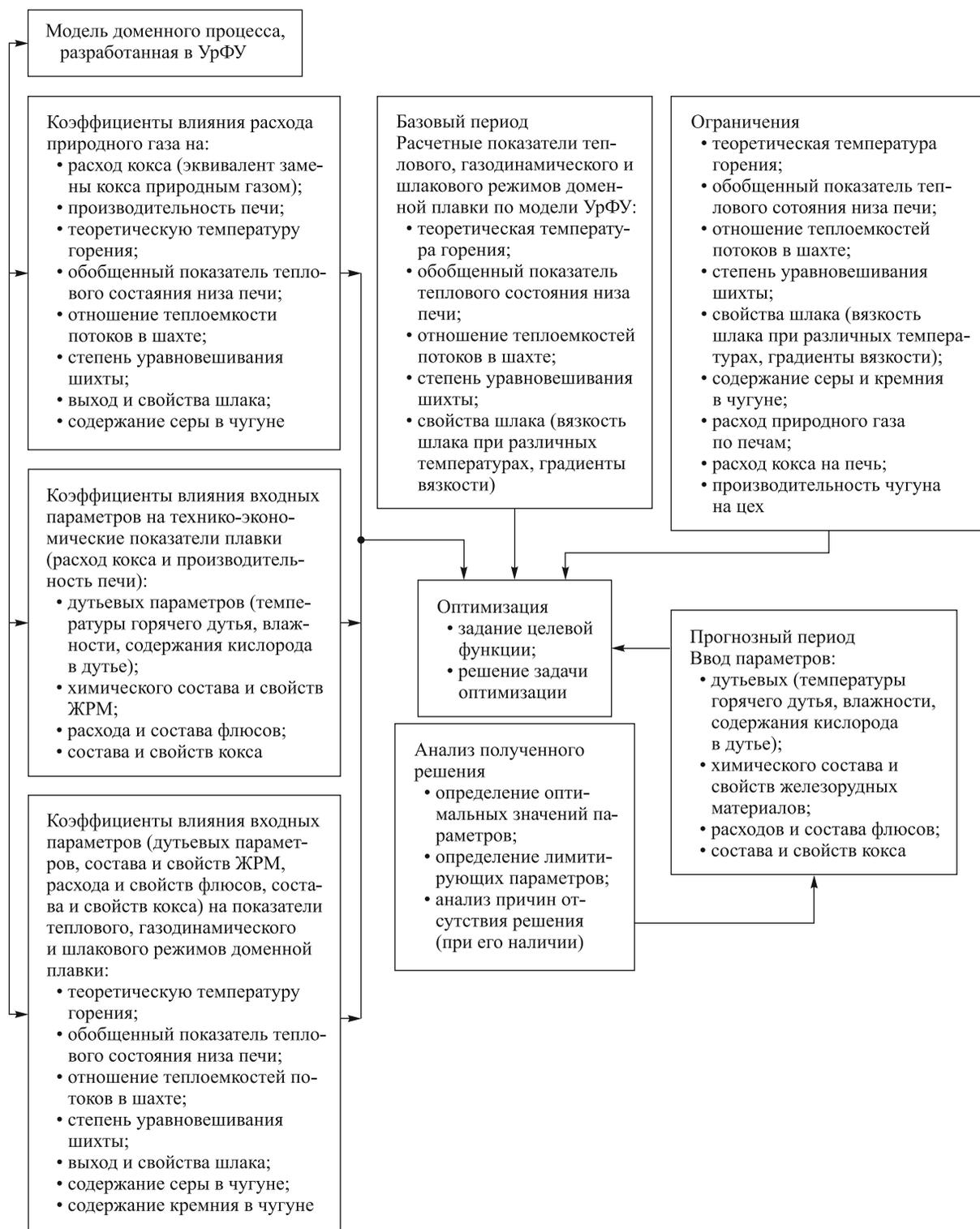


Рис. 1. Структура модели оптимизации распределения природного газа в доменном цехе

Базовый период. Оценка теплового, газодинамического и шлакового режимов работы каждой из доменных печей цеха предусматривает:

– расчет комплекса параметров теплового, газодинамического и шлакового режимов доменной плавки (около 30 параметров) [3, 8 – 10];

– расчет коэффициентов влияния параметров шихты и дутьевых параметров на показатели теплового, газо-

динамического и шлакового режимов доменной плавки, а также параметров шихты и дутьевых параметров на технико-экономические показатели плавки (расход кокса и производительность).

Прогнозный период. Ввод параметров шихты и дутьевых параметров каждой из доменных печей цеха:

– дутьевых параметров (температуры, влажности, содержания кислорода в дутье);

- химического состава и свойств железорудных материалов;
- расходов и составов флюсов;
- состава и свойств кокса.

В общем виде расчет изменения выходных параметров определялся по следующей линейной форме:

$$\Delta y_{ji} = (x_{ji}^{np} - x_{ji}^{\delta}) k_{x_{ji}}^{\delta}, \quad (1)$$

где Δy_{ji} – изменение i -го расчетного параметра y на j -й печи; x_{ji}^{np} и x_{ji}^{δ} – величина параметра x_i на j -й печи в проектном и базовом периодах; $k_{x_{ji}}^{\delta}$ – коэффициент передачи (корректировочный коэффициент) на j -й печи по i -му каналу воздействия, определяемый по модели доменной плавки по результатам работы соответствующей доменной печи в базовом периоде [3, 4, 8, 9].

В общем виде значение параметров доменной плавки в проектном периоде определяется из правила аддитивности:

$$y_j^{np} = \sum \Delta y_{ji} + y_j^{\delta}, \quad (2)$$

где $\sum \Delta y_{ji}$ – сумма изменений параметра y , вызванных изменениями различных параметров x на i -й печи; y_j^{δ} – значение j -го параметра y в базовом периоде.

Ограничения на значения параметров предусматривают задание:

- теоретической температуры горения на фурмах T_j , °C ($T_j^{\min} \leq T_j \leq T_j^{\max}$);
- обобщенного показателя теплового состояния низа печи Q_{ni} , МДж/т чугуна ($Q_{ni}^{\min} \leq Q_{ni} \leq Q_{ni}^{\max}$);
- отношения теплоемкостей потоков шихты и газов в шахте m_j , доли ($m_j^{\min} \leq m_j \leq m_j^{\max}$);
- степени уравнивания шихты газовым потоком Cy_j , доли ($Cy_j^{\min} \leq Cy_j \leq Cy_j^{\max}$);
- свойств шлака:
 - вязкости ($\eta_{\text{шл}}$) при заданной температуре на выпуске 1400 °C – $\eta_{\text{шл}}^{1400}$, 1500 °C – $\eta_{\text{шл}}^{1500}$, ($\eta_{\text{шл}}^{\min} \leq \eta_{\text{шл}} \leq \eta_{\text{шл}}^{\max}$, $\eta_{\text{шл}}^{1400 \min} \leq \eta_{\text{шл}}^{1400} \leq \eta_{\text{шл}}^{1400 \max}$, $\eta_{\text{шл}}^{1500 \min} \leq \eta_{\text{шл}}^{1500} \leq \eta_{\text{шл}}^{1500 \max}$);
 - градиентов вязкости $\Delta \eta_{0,7}^{2,5}$ и $\Delta \eta_{1400}^{1500}$ ($\Delta \eta_{0,7}^{2,5}$ показывает, насколько быстро шлак теряет подвижность в области пониженных температур («короткий» или «длинный» шлак) и численно равен изменению вязкости шлака при увеличении его температуры на 1 °C в диапазоне от 2,5 Па·с (25 пуаз) до 0,7 Па·с (7 пуаз) ($\Delta \eta_{0,7}^{\min, 2,5} \leq \Delta \eta_{0,7}^{2,5} \leq \Delta \eta_{0,7}^{\max, 2,5}$); $\Delta \eta_{1400}^{1500}$ показывает, насколько устойчив шлак в области конечных (рабочих) температур, численно равный изменению его вязкости на 1 °C в пределах 1400 – 1500 °C ($\Delta \eta_{1400}^{\min, 1500} \leq \Delta \eta_{1400}^{1500} \leq \Delta \eta_{1400}^{\max, 1500}$);
- содержания серы $[S_j]$ и кремния $[Si_j]$ в чугуне, % ($[S_j^{\min}] \leq [S_j] \leq [S_j^{\max}]$; $[Si_j^{\min}] \leq [Si_j] \leq [Si_j^{\max}]$);
- расхода природного газа по печам $V_j^{n.r}$, м³/ч ($V_j^{n.r \max} \leq V_j^{n.r} \leq V_j^{n.r \min}$).

Ограничения в целом по цеху предусматривают задание:

- суммарного расхода кокса на цех G_{Σ}^k , т/ч ($G_{\Sigma}^{k \min} \leq G_{\Sigma}^k \leq G_{\Sigma}^{k \max}$);
- заданного цехового производства чугуна G_{Σ}^q , т/ч ($G_{\Sigma}^{q \min} \leq G_{\Sigma}^q \leq G_{\Sigma}^{q \max}$);
- общего расхода природного газа на цех $V_{\Sigma}^{n.r}$, м³/ч ($V_{\Sigma}^{n.r \min} \leq V_{\Sigma}^{n.r} \leq V_{\Sigma}^{n.r \max}$).

Предельно допустимые значения величин, т.е. численные значения параметров определяются методом математического моделирования, а при отсутствии такой возможности – методом экспертных оценок, что позволяет осуществлять настройку модели на реальный процесс, в том числе и путем формализации опыта инженерно-технического и технологического персонала [3, 4].

Блок «**Оптимизация**» предусматривает:

- задание целевой функции; в общем виде математическая модель оптимального распределения природного газа в доменном цехе содержит линейную целевую функцию и ограничения, целевая функция сводит к максимуму эффективность использования природного газа в цехе:

$$Z = \sum_{j=1}^n \left\{ \alpha (e_j C_k - C_{n.r}) + (1 - \alpha) \times C_n \left[\Delta P_j^{n.r} - e_j \Delta P_j^k \right] \right\} V_j^{n.r} \rightarrow \max, \quad (3)$$

где Z – эффективность использования природного газа в цехе, руб/ч; n – количество печей в цехе, шт.; α – весовой коэффициент, который определяет, что предпочтительнее – выигрыш в денежном выражении или в производительности, ($0 < \alpha \leq 1$); e_j – эквивалент замены кокса на природный газ, кг кокса/м³ природного газа; C_k и $C_{n.r}$ – стоимость кокса, руб/кг кокса, и природного газа, руб/м³; C_n – условно постоянный коэффициент, который показывает, на сколько увеличиваются затраты при росте производительности, руб/т чугуна; ΔP_j^k и $\Delta P_j^{n.r}$ – изменение производительности j -й печи при увеличении расхода природного газа на 1 м³, т чугуна/м³ ПГ, и при увеличении расхода кокса на 1 кг, т чугуна/кг кокса; $V_j^{n.r}$ – расход природного газа на j -й печи, м³/ч; – решение задачи оптимизации.

Блок «**Анализ полученного решения**» предусматривает:

- расчет оптимальных значений расхода природного газа на печах и параметров работы отдельных печей и цеха в целом в проектном периоде;
- определение видов и значений лимитирующих параметров;
- выполнение анализа причин отсутствия решения (при его отсутствии).

По представленной модели разработана информационно-моделирующая система оптимизации распределения природного газа в доменном цехе (рис. 2),

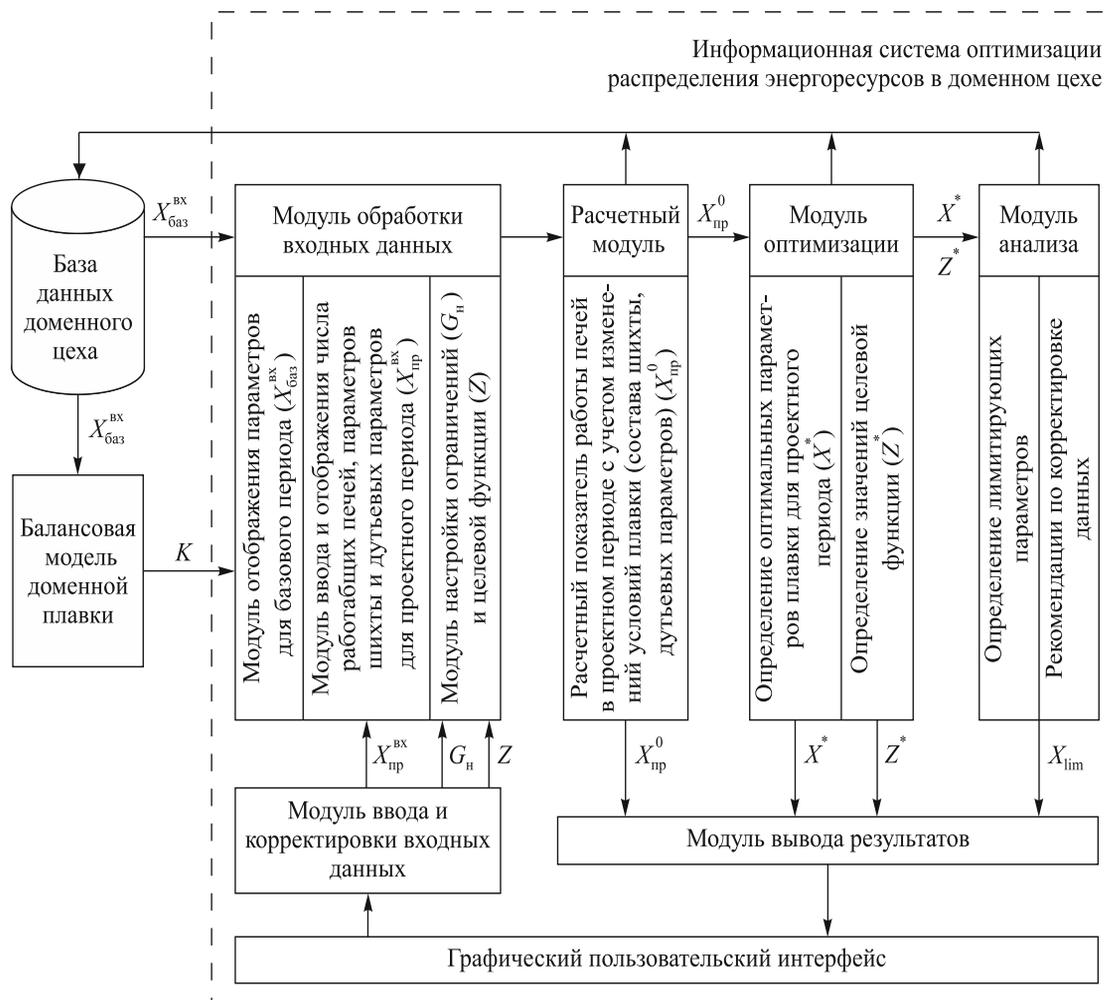


Рис. 2. Структура информационной системы оптимизации распределения природного газа:

$X_{\text{баз}}^{\text{вх}}$ и $X_{\text{пр}}^{\text{вх}}$ – векторы входных параметров для базового и проектного периодов; K – вектор корректировочных коэффициентов; $X_{\text{пр}}^0$ – вектор рассчитанных параметров для проектного периода; $X_{\text{лим}}$ – вектор рассчитанных значений лимитирующих параметров; X^* – вектор оптимальных значений параметров; Z^* – оптимальное значение целевой функции

включающая модули ввода и корректировки входных данных, обработки входных данных, расчетный модуль, оптимизации, вывода и анализа результатов.

На рис. 3 приведены результаты сравнительного анализа распределения природного газа на основе данных работы доменного цеха ОАО «ММК». Анализ результатов показывает, что оптимизационная модель совместного распределения природного газа и кислорода позволяет эффективно использовать имеющиеся топливно-энергетические ресурсы с учетом технологических ограничений на работу отдельных печей и цеха в целом.

Выводы. Использование разработанного модуля в современной информационно-моделирующей системе АСУ доменной плавки позволяет решать оперативные задачи управления технологией доменной плавки, обеспечивает повышение эффективности принятия решений инженерно-техническим персоналом в условиях изменений объема топливно-энергетических ресурсов, нестабильности состава

и качества проплавляемого железорудного сырья и конъюнктуры рынка.

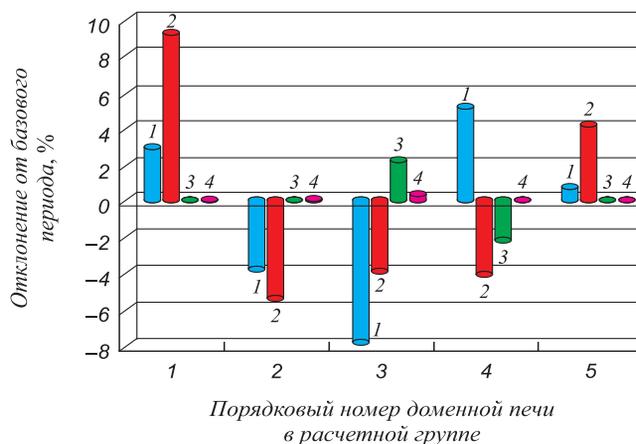


Рис. 3. Результаты сравнительного анализа распределения природного газа в группе доменных печей: 1 – расход природного газа; 2 – расход кислорода; 3 – производительность; 4 – расход кокса

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цирлин А.М. Оптимальное управление технологическими процессами. – М.: Энеоатомиздат, 1986. – 400 с.
2. Рейклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. – М.: Мир, 1986. – 350 с.
3. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спириин, В.Л. Терентьев и др. Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: изд. УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
4. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спириин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: изд. УрФУ, 2011. – 456 с.
5. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н.А. Спириин, В.В. Лавров, С.И. Паршаков и др. Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: изд. УГТУ–УПИ, 2006. – 307 с.
6. Спириин Н.А., Овчинников Ю.Н., Косаченко И.Е. и др. // Сталь. 1991. № 8. С. 13 – 18.
7. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. – М.: Изд-во Российские университеты, 2008. – 487 с.
8. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю. и др. // Сталь. 2000. № 9. С. 12 – 15.
9. Zagajnov S.A., Onorin O.P., Spirin N.A., Yaroshenko Yu.G. // Steel in Translation. 2003. Vol. 33. № 12. P. 1 – 5.
10. Lavrov V.V., Babin I.A., Spirin N.A. // Steel in Translation. 2007. Vol. 37. № 12. P. 998 – 1001.

© 2014 г. Н.А. Спириин, Л.Ю. Гилёва,
В.В. Лавров, А.С. Истомин, И.А. Гуриин, А.А.
Бурыкин, К.А. Щипанов
Поступила 12 декабря 2013 г.

THE OPTIMIZATION OF NATURAL GAS DISTRIBUTION IN A BLAST FURNACE WHEN CHANGING THE PARAMETERS OF MELTING

N.A. Spirin, Dr. Eng., Professor

L.Y. Gilyova, Cand. Eng., Assist. Professor

V.V. Lavrov, Cand. Eng., Assist. Professor

A.S. Istomin, Postgraduate

I.A. Gurin, Student

A.A. Buriykin, Cand. Eng., Assist. Professor

K.A. Shchipanov, Cand. Eng., Assist. Professor

Ural Federal University (Ekaterinburg, Sverdlovsk Region, Russia)

E-MAIL: n.a.spirin@ustu.ru

Abstract. This paper presents a model of distribution optimization of energy resources in a blast furnace subject to the changes in parameters of melting. This optimization model can predict the injected fuel parameters in individual blast furnaces in various technological situations of a blast-furnace plant. The usage of the developed module in a modern blast furnace information-modeling system allows solving operational management tasks of blast furnace technology, enhancing the efficiency of decision-making engineering staff in terms of changes in volume of energy resources, instability, composition and the quality of melted iron ore and market conditions.

Keywords: blast furnace production, optimization, mathematical modeling, distribution of energy resources, melting parameters.

REFERENCES

1. Tsirlin A.M. *Optimal'noe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami* (The optimal control of technological processes). Moscow: Energoatomizdat, 1986. 400 p.
2. Reykletis G., Reyvindran A., Ragsdel K. *Optimizatsiya v tekhnike* (Optimization in technique). Moscow: Mir, 1986. 350 p.
3. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L. etc. *Komp'yuterniye metodi modelirovaniya domennogo protsesssa* (Computer modeling techniques blast furnace process). Ekaterinburg: izd. UGTU–UPI, 2005. 301 p.
4. Spirin N.A., Lavrov V.V., Ribolovlev V.Yu. etc. *Model'niye sistemi podderzhki prinyatiya resheniy v ASU TP domennoy plavki* (Model of decision support system in the blast furnace process control system). Ekaterinburg: izd. UrFU, 2011. 456 p.
5. Spirin N.A., Lavrov V.V., Parshakov S.I. etc. *Optimizatsiya i identifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v metallurgii* (Optimization and identification of metallurgical processes). Ekaterinburg: izd. UGTU–UPI, 2006. 307 p.
6. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Kosachenko I.E. etc. *Stal'*. 1991. № 8. Pp. 13 – 18.
7. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Mishlyaev L.P. etc. *Teoriya i praktika prognozirovaniya v sistemakh upravleniya*. (Theory and practice of forecasting in control systems). Moscow: Izd-vi Rossiyskiye universiteti, 2008. 487 p.
8. Zagaynov S.A., Onorin O.P., Gilyova L.Yu. etc. *Stal'*. 2000. № 9. Pp. 12 – 15.
9. Zagaynov S.A., Onorin O.P., Spirin N.A., Yaroshenko Yu.G. *Steel in Translation*. 2003. Vol. 33. № 12. Pp. 1 – 5.
10. Lavrov V.V., Babin I.A., Spirin N.A. *Steel in Translation*. 2007. Vol. 37. № 12. Pp. 998 – 1001.

Received December 12, 2013