



УДК 669.184

Поступила 08.07.2016

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКОЙ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ CONTROL ALGORITHMS OF BOF MELTING WITH CONSIDERING THE INFLUENCE OF UNCONTROLLED DISTURBANCE

*В. С. БОГУШЕВСКИЙ, А. Э. СКАЧОК, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина, ул. Политехническая, 35, корп. 9. E-mail: bogysh@gmail.com*

*V. S. BOGUSHEVSKY, O. E. SKACHOK, National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnical Institute», Kiev, Ukraine, 35, Politechnicheskaya str. E-mail: bogysh@gmail.com*

*Рассмотрено влияние неконтролируемых возмущающих воздействий на выходные параметры конвертерной плавки. Приведены численные показатели влияния на плавку ввода известняка вместо извести и попадания воды из охлаждаемых элементов на обезуглероживание, температуру ванны и основность шлака. Проанализированы результаты влияния загрязнения лома, попадания миксерного шлака с чугуном. Создан алгоритм управления с учетом влияния неконтролируемых возмущающих воздействий.*

*The article describes influence of uncontrollable disturbances for output parameters of converting smelting. You also find numerical values of impact impurity of scrap, falling mixer slag with cast iron, limestone instead of lime and water from cooled elements on decarbonization, bathtub temperature and slag basicity. Created a control algorithm with the influence of uncontrolled disturbance.*

**Ключевые слова.** Алгоритм управления, конвертер, параметры, примеси, лом, шлакообразование, плавка, неконтролируемые возмущения, химический состав.

**Keywords.** Control algorithm, converter, parameters, contaminants, scrap, scorification, smelting, uncontrollable disturbances, chemical composition.

### Введение

Конвертерной плавке присущи нестационарные и взаимно коррелированные шумы и помехи измерения, существенный дрейф рабочих параметров вследствие наличия неконтролируемых возмущений. Так, например, примеси лома и миксерный шлак, попадающие в конвертер при операциях завалки и заливки, не только искажают информацию о массе металлической части шихты, но и приводят к нарушению процесса, что ухудшает качество управления. Увеличение массы миксерного шлака на 1% увеличивает брак стали на 0,1% и продолжительность продувки на 0,7 мин. При уменьшении попадания в конвертер воды, охлаждающей фурму или охладитель конвертерных газов (ОКГ) на 10 л/мин, расход чугуна снижается на 0,2–0,5 кг/т стали.

Металлической лом характеризуется химическим составом, температурой и насыпной массой. Насыпная масса существенно влияет на температурный ход процесса, изменяя момент расплавления лома. Исследования, проведенные нами, показывают, что при заливке чугуна в результате снижения его температуры при соприкосновении с ломом и футеровкой расплав частично затвердевает. В большегрузных конвертерах затвердевший чугун присутствует в ванне значительное время (на протяжении 40–50% продувки). При малой насыпной массе лом плавится в начале продувки, что приводит к снижению температуры реакционной зоны, при большой – расплавление происходит более равномерно. Расчеты показывают, что в этом случае теплоты, аккумулированной ванной к 25% продолжительности продувки, хватило бы для расплавления всего лома. Наличие нерасплавившегося лома на протяжении 80% продувки свидетельствует о малой величине теплового потока от жидкой ванны к твердым кускам. Это можно объяснить низким уровнем теплообменных процессов в ванне вследствие большой ее гетерогенности, а также малой площадью поверхности контакта лома с жидким расплавом.

Следует также отметить, что переохлаждение ванны при использовании лома с малой насыпной плотностью вызывает торможение реакции  $Fe + CO_2 = FeO + CO$ . В результате увеличивается доля углерода, окислившегося до  $CO_2$ , что способствует росту теплового потенциала плавки. Использование лома с пониженной насыпной плотностью позволяет уменьшить расход чугуна на 4,35 кг/т стали.

Единственное средство контроля насыпной плотности лома – количество заваливаемых совков на плавку. Но такой контроль является грубым. Поэтому наиболее рациональный метод исключения влияния этого возмущающего воздействия – усреднять лом на скраповом дворе по химическому составу и насыпной плотности. Усреднение требуется также по содержанию  $CO_2$  в обожженной извести. Достигнуть одинакового качества извести можно, унифицируя ее производство.

### Постановка задачи исследований

Цель исследований – повышение точности управления конвертерной плавкой путем определения и учета влияния начальных возмущающих воздействий на ее протекание.

**Примеси лома.** Лом в качестве примесей может содержать песок и ржавчину (окалину), которые влияют на режимы обезуглероживания, температурный и шлакообразования.

Расчеты изменения температуры готового металла в конвертере при замене лома песком и ржавчиной  $\Delta t_{1,2}$ ; физическом охлаждающем эффекте песка  $\Delta t_3$ ; повышении температуры металла в конвертере за счет ошлакования песка  $\Delta t_4$ ; физическом охлаждающем эффекте извести  $\Delta t_5$  представлены в работе [1].

Физический охлаждающий эффект ржавчины можно определить по формуле

$$\Delta t_6 = m_2 c_{рж} \bar{t}_M / (mc), \quad (1)$$

где  $c_{рж} = 897$  – средняя теплоемкость ржавчины в интервале рабочих температур, Дж/(кг·К);  $\bar{t}_M = 1620$  – средняя температура металла на выпуске из конвертера, °С;  $m = m_{л} + m_{ч}$  – масса металлошхты, т;  $m_{л}$ ,  $m_{ч}$  – масса лома и чугуна соответственно, т;  $c = 880$  – средняя удельная теплоемкость конвертерной ванны в интервале рабочих температур, Дж/(кг·К).

Массовые доли  $FeO$  и  $Fe_2O_3$  в ржавчине (окалине) лома соответственно составляют  $a_3 = 30,6$  и  $a_4 = 69,4\%$ . Понижение температуры металла в конвертере за счет разложения ржавчины лома составит

$$\Delta t_7 = a_2 (Q_2 a_3 + Q_3 a_4) m_{л} / (10mc), \quad (2)$$

где  $a_2$  – доля ржавчины, % от массы лома;  $Q_2 = 3710$  – удельный тепловой эффект реакции разложения монооксида железа, кДж/(кг FeO);  $Q_3 = 5150$  – удельный тепловой эффект реакции разложения оксида железа, кДж/(кг  $Fe_2O_3$ ).

При введении твердого окислителя (окалины) в ванну в начале продувки кислород, который высвободился с оксидов железа, практически полностью тратится на дополнительное окисление углерода. Для упрощения примем, что углерод ванны окисляется до CO. Удельный тепловой эффект составляет  $Q_4 = 12800$  кДж/(кг·°С). При дополнительном окислении углерода повышается температура металла, которую можно представить в виде:

$$\Delta t_8 = 10^3 m_3 Q_4 / (mc), \quad (3)$$

где  $m_3 = 10^{-4} \frac{12}{16} a_2 m_{л} \left( \frac{16}{72} a_3 + \frac{48}{160} a_4 \right)$  – масса углерода ванны, окисляющаяся высвободившемся кислородом, т, которая в перерасчете на относительное значение  $\Delta C_1$ , %, составит

$$\Delta C_1 = 100 m_3 / m. \quad (4)$$

Суммарный температурный эффект воздействия на металлическую ванну ржавчины лома представим в виде

$$\Delta t_{\Sigma 2} = \Delta t_2 - \Delta t_6 - \Delta t_7 + \Delta t_8. \quad (5)$$

**Миксерный шлак.** Замещаемая чугуном масса миксерного шлака составляет

$$m_{м.шл.} = 0,01 a_5 m_{ч}, \quad (6)$$

где  $a_5$  – доля миксерного шлака от массы чугуна, %.

Понижение температуры металла в конвертере из-за дефицита теплоты можно определить по выражению

$$\Delta t_9 = 0,1 Q_{\Sigma} a_5 m_{\text{ч}} / (mc), \quad (7)$$

где  $Q_{\Sigma} = \sum_{(R)} Q_{RO_2} \Delta R$  – удельное количество теплоты, выделяющейся при окислении примесей чугуна,  $R \in \text{Si, Mn, P}$ , кДж/100 кг чугуна;  $Q_{\text{SiO}_2} = 24480$ ,  $Q_{\text{MnO}} = 6820$ ,  $Q_{\text{P}_2\text{O}_5} = 18620$  – удельные тепловые эффекты образования соответствующих оксидов при средней температуре ванны (1500 °С) с участием холодного газообразного кислорода, кДж/кг окисляемого элемента;  $\Delta R$  – массовая доля соответствующего окисляющегося элемента чугуна, %.

Понижение температуры металла в конвертере за счет дефицита теплоты шлакообразования вследствие уменьшения массы шлакообразующих оксидов элементов чугуна составляет

$$\Delta t_{10} = 0,1 Q_5 a_5 / c, \quad (8)$$

где  $Q_5 = 9370$  – удельная теплота шлакообразования оксидов элементов чугуна, кДж/100 кг металлошихты.

Понижение конечной массовой доли углерода в металле составит

$$\Delta C_2 = 0,01 a_5 m_{\text{ч}} C_{\text{ч}} / m, \quad (9)$$

где  $C_{\text{ч}}$  – массовая доля углерода в чугуне, %.

Повышение температуры металла в конвертере вследствие увеличения удельной энтальпии миксерного шлака над удельной энтальпией жидкого чугуна получим из выражения

$$\Delta t_{11} = 10^{-3} \Delta Q / (mc), \quad (10)$$

где  $\Delta Q = 10 a_5 m_{\text{ч}} (Q_6 - Q_7)$  – избыток удельной энтальпии, Дж/кг;  $Q_6 = -587 \cdot 10^3 + 1465 \bar{t}_{\text{ч}}$  – удельная энтальпия миксерного шлака, Дж/кг;  $Q_7 = 61900 + 880 \bar{t}_{\text{ч}}$  – удельная энтальпия жидкого чугуна, Дж/кг.

Часть от общей массы извести на плавку, израсходованной на шлакообразования компонентов миксерного шлака, находим из балансового уравнения

$$\bar{B} = (0,01 \text{CaO} a_5 m_{\text{ч}} + 86,2 m_{\text{и2}}) / (0,01 (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) a_5 m_{\text{ч}}), \quad (11)$$

откуда

$$m_{\text{и2}} = 0,01 a_5 m_{\text{ч}} (\bar{B} (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5) - \text{CaO}) / 86,2, \quad (12)$$

где CaO, SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – оксидные компоненты миксерного шлака, %.

Повышение температуры металла в конвертере при этом составит

$$\Delta t_{12} = 10 a_5 m_{\text{ч}} Q_8 / (mc), \quad (13)$$

где  $Q_8$  – удельная теплота образования основного шлака из оксидных компонентов миксерного шлака, кДж/кг.

Пренебрегая значением P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, величину  $Q_8$  рассчитываем по уравнению:

$$Q_8 = 628 \frac{86,2 m_{\text{и2}}}{0,01 (\text{CaO} + \text{SiO}_2) a_5 m_{\text{ч}} + 86,2 m_{\text{и2}}} + 1460 \frac{0,01 (\text{SiO}_2 - \text{CaO} / \bar{B}) a_5 m_{\text{ч}}}{0,01 (\text{CaO} + \text{SiO}_2) a_5 m_{\text{ч}} + 86,2 m_{\text{и2}}}. \quad (14)$$

В случае попадания в ванну отдельно от чугуна миксерного шлака и дополнительной подачи сбалансированной массы извести на ошлакование его компонентов изменение выходных параметров продувки обуславливается окислительно-охлаждающим действием добавки, которое можно определить по линейной балансовой модели расчета шихты, преобразованной в частные приращения искоемых величин:

$$\partial C_1 = -2 m_{\text{и2}} / m_{\text{ч}} \quad (15)$$

и

$$\partial t_1 = -79 \partial C_1 - 1430 m_{\text{и2}} / m_{\text{ч}} \quad (16)$$

где  $\partial C_1$ ,  $\partial t_1$  – частные приращения соответственно массовой доли углерода в металле, %, и его температуры, °С.

Изменение основности конечного шлака при этом не наблюдается, а суммарный температурный эффект воздействия на металлическую ванну составит

$$\Delta t_{\Sigma 5} = \Delta t_{12} + \partial t_1. \quad (17)$$

**Известь.** Изменение выходных параметров продувки при замене извести известняком, содержащим недопал, определяем по линейной балансовой модели расчета шихты, преобразованной в частные приращения искомых величин:

$$\partial C_2 = -(3m_{ик} + 2m_{и}) / m_{ч}, \quad (18)$$

$$\partial t_2 = -79\partial C_3 - (2750m_{ик} + 1430m_{и}) / m_{ч}, \quad (19)$$

$$\partial B_4 = (51m_{ик} + 75m_{и}) / (12,3 + 2,14Si_{и}m_{ч}), \quad (20)$$

где  $\partial C_2$ ,  $\partial t_2$ ,  $\partial B_4$  – частные приращения соответственно массовой доли углерода в металле, %, его температуры, °С, и основности конечного шлака;  $m_{ик}$ ,  $m_{и}$  – масса соответственно известняка и извести, т.

Полученные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1. Воздействие неконтролируемых возмущений ванны на конечные параметры продувки

| Возмущение  | Воздействие на конечные параметры   |                         |                  |
|---|-------------------------------------|-------------------------|------------------|
|   | массовая доля углерода в металле, % | температура металла, °С | основность шлака |
| Замена 1% массы лома:<br>песком                   | –                                   | –0,9                    | –0,286           |
|   | ржавчиной (окалиной)                | –4,18                   | –                |
| Попадание 1% окалины от массы лома                | –0,05                               | –9,7                    | –                |
| Замена 1% массы чугуна миксерным шлаком           | –0,033                              | –16,04                  | –0,065           |
| Попадание 1% миксерного шлака от массы чугуна     | –0,032                              | –14,0                   | –                |
| Замена 1% массы извести известняком               | –0,0011                             | –1,37                   | –0,015           |
| Попадание 0,1% от массы чугуна влаги из:<br>фурмы | –0,0512                             | –26,2                   | –                |
|   | ОКГ                                 | –18,3                   | –                |

На основе полученных данных создана математическая модель для уменьшения воздействий неконтролируемых возмущений в последующих плавках. Для расчета каждого из представленных возмущений составлена система уравнений:

$$\begin{cases} 0,05x_2 + 0,05x_3 + 0,033x_4 + 0,032x_5 + 0,0011x_6 + 0,0512x_7 + 0,0358x_8 = \Delta C, \\ 0,9x_1 + 4,18x_2 + 9,7x_3 + 16,04x_4 + 14x_5 + 1,37x_6 + 26,2x_7 + 18,3x_8 = \Delta t, \\ 0,286x_1 + 0,065x_4 + 0,015x_6 = \Delta B, \end{cases} \quad (21)$$

где  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$  – соответственно содержание возмущающих воздействий при замене 1% массы лома песком, при замене 1% массы лома ржавчиной (окалиной), при попадании 1% окалины от массы лома, при замене 1% массы чугуна миксерным шлаком при попадании 1% миксерного шлака от массы чугуна, при замене 1% массы извести известняком при попадании 0,1% от массы чугуна влаги из фурмы и ОКГ, %;  $\Delta C$  – отклонение содержания углерода от заданного, %;  $\Delta t$  – отклонение температуры от заданной, °С;  $\Delta B$  – отклонение основности шлака от заданного.

Стандартные вычислительные методы не подходят для решения такой сложной системы уравнений. Для решения системы была использована надстройка «Поиск решения» стандартной программы Excel, которая входит в пакет Microsoft Office.

Алгоритм решения показан на рис. 1.

В программе Excel созданы три таблицы: табл. 1 – отклонения параметров от заданных (рис. 2), табл. 2 – воздействие на конечные параметры (рис. 3), табл. 3 – расчет процентного содержания возмущающих воздействий (рис. 4). В таблицу 1 «Отклонения параметров от заданных» вносятся отклонения, которые получились после предыдущей плавки (выделенная строка на рис. 2). После этого сформирована таблица с полученными данными о воздействии на конечные параметры.

С помощью надстройки «Поиск решения» формируется система уравнений как сумма произведений выделенного столбца на рис. 4 и столбцов на рис. 3 для каждого параметра строки рис. 2 соответственно. После этого задаются ограничения, что количество возмущающих воздействий не может быть меньше 0. Целевыми ячейками для поиска решения будут ячейки столбца «Количество». Для проверки адекватности программы после нахождения значений столбца «Количество» программа рассчитывает «Суммарное влияние» (выделенная строка на рис. 4).

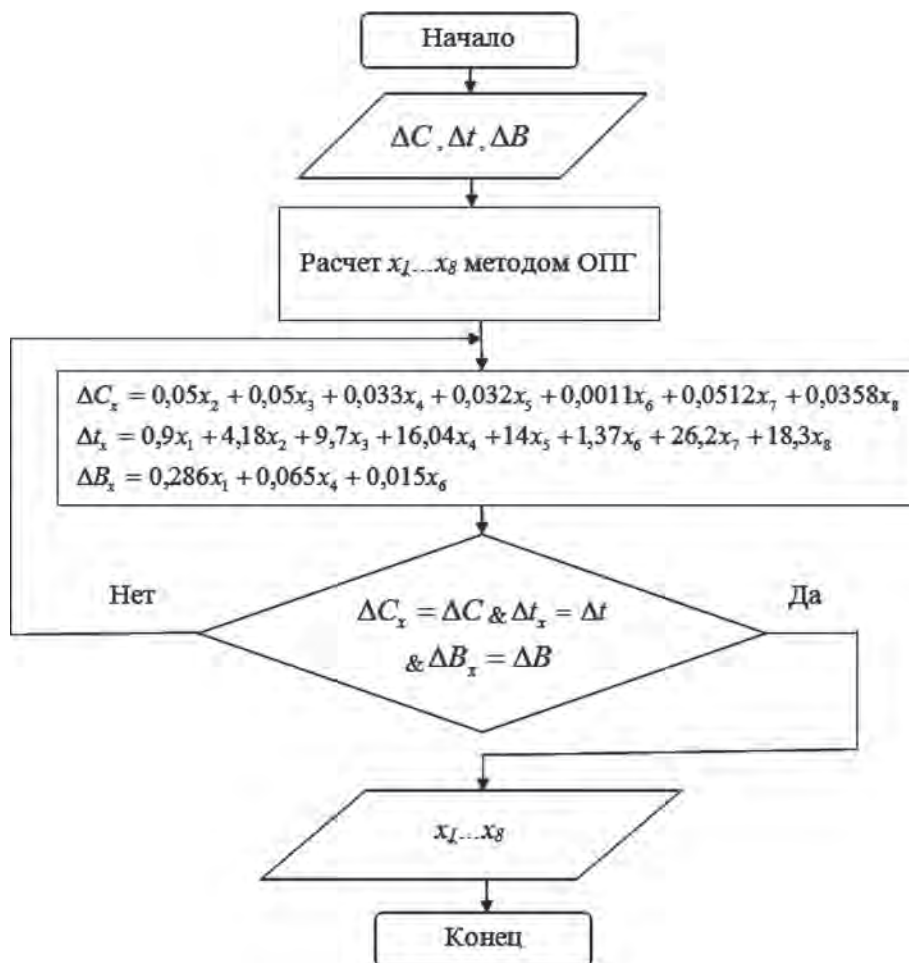


Рис. 1. Алгоритм решения системы уравнений

| Отклонения параметров от заданных |     |      |
|-----------------------------------|-----|------|
| %С                                | Т   | В    |
| -0,07                             | -15 | -0,4 |

Рис. 2. Отклонения параметров от заданных

| Воздействие на конечные параметры                   |         |        |        |
|---|---------|--------|--------|
| Возмущения  | %С      | Т      | В      |
| Замена 1% массы лома песком                         | 0       | -2,58  | -0,286 |
| Замена 1% массы лома ржавчиной (окалиной)           | -0,05   | -5,86  | 0      |
| Попадание 1% окалины от массы лома                  | -0,05   | -9,7   | 0      |
| Замена 1% массы чугуна миксерным шлаком             | -0,033  | -16,04 | -0,065 |
| Попадание 1% миксерного шлака от массы чугуна       | -0,033  | -14    | 0      |
| Замена 1% массы извести известняком                 | -0,0011 | -1,37  | -0,015 |
| Попадание 0,1% от массы чугуна влаги из фурмы       | -0,0512 | -26,2  | 0      |
| Попадание 0,1% от массы чугуна влаги из фурмы с ОКГ | -0,0358 | -18,3  | 0      |

Рис. 3. Воздействие на конечные параметры

| Расчет возмущающих воздействий                      |               |       |       |       |
|---|---------------|-------|-------|-------|
|   | Количество, % | %С    | Т     | В     |
| Замена 1% массы лома песком                         | 1,35          | 0,00  | -3,49 | -0,39 |
| Замена 1% массы лома ржавчиной (окалинс             | 0,89          | -0,04 | -5,20 | 0,00  |
| Попадание 1% окалины от массы лома                  | 0,45          | -0,02 | -4,37 | 0,00  |
| Замена 1% массы чугуна миксерным шлаком             | 0,08          | 0,00  | -1,24 | -0,01 |
| Попадание 1% миксерного шлака от массы чугуна       | 0,00          | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| Замена 1 % массы извести известняком                | 0,51          | 0,00  | -0,70 | -0,01 |
| Попадание 0,1% от массы чугуна влаги из фурмы       | 0,00          | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| Попадание 0,1% от массы чугуна влаги из фурмы с ОКГ | 0,00          | 0,00  | 0,00  | 0,00  |
| Суммарное влияние                                   |               | -0,07 | -15   | -0,4  |

Рис. 4. Расчет процентного содержания возмущающих воздействий

Полученные данные можно использовать как поправочные коэффициенты при следующей плавке.

Полученные результаты использованы нами в алгоритмах статического и динамического управления с обратной связью выходных параметров. При этом число плавов, выпускаемых с первой повалки, увеличилось на 7%.

### Выводы

Результаты оценки влияния неконтролируемых возмущающих воздействий на ход конвертерной плавки показали их существенную величину как на процесс обезуглероживания ванны, ее температурный режим, так и шлакообразования. Учесть это влияние можно путем введения обратных связей по результатам проведенных плавов или по контролю динамических параметров. Существенное уменьшение влияния неконтролируемых возмущающих воздействий можно достичь тщательной подготовкой шихтовых материалов.

### Литература

1. Bogushevsky V., Skachok A. The influence of uncontrolled disturbance actions on control of converter melting // *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. No. 5. P. 128–133.
2. **Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський та ін.; За ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ: Вища шк., 2006. 503 с.**
3. **Металургія сталі. Конвертерне виробництво: Теорія, технологія, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія. Підручник / О. Г. Величко, Б. М. Бойченко, П. С. Харлашин та інш. Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-вал». 2015. 434 с.**
4. **Зайцев А. И., Могутнов Б. М., Шахпазов Е. Х. Физическая химия металлургических шлаков. М.: Интерконтакт Наука, 2008. 352 с.**
5. **Кулик А. Д. Совершенствование выпуска стали из конвертера / А. Д. Кулик, М. А. Кашеев, А. А. Похвалитый // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. № 1. С. 18–20.**
6. **Уманский А. А. Исследование влияния состава исходной металлической шихты на качество конвертерной стали / А. А. Уманский, Н. А. Чернышева // Вестн. горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Сб. науч. тр. М.-Новокузнецк, 2010. № 25. С. 42–47.**
7. **Кудрин В. А. Теория и технология производства стали. М.: Мир, ООО «Изд-во АСТ», 2003. 528 с.**
8. **Добужская А. Б., Галицын Г. А., Белокурова Е. В. Новые технологии и материалы в металлургии // Сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. С. 307–318.**
9. **Окорочков Б. Н., Комолова О. А., Григорович К. В. Физико-химическое описание взаимодействия компонентов в системе шлак-металл // Междун. науч. конф. «Физико-химические основы металлургических процессов», посвященная 110-летию со дня рождения академика А. М. Самарина // Сб. материалов, 2012. С. 47.**

### References

1. Bogushevsky V., Skachok A. The influence of uncontrolled disturbance actions on control of converter melting. *Metallurgical and Mining Industry*, 2016, no. 5, pp. 128–133.

2. **Osnovi metalurgijnogo virobnictva metaliv i splaviv:** Pidruchnik [Fundamentals of metallurgical production of metals and alloys: Textbook]. D. F. Chernega, V. S. Bogushevs'kij, Ju. Ja. Gotvjans'kij ta in.; Za red. D. F. Chernegi, Ju. Ja. Gotvjans'kogo. Kiev: Vishha shkola Publ., 2006, 503 p.
3. **Metallurgija stali. Konverterne virobnictvo: Teorija, tehnologija, konstrukcii agregativ, recirkulacija materialiv i ekologija.** Pidruchnik [Metallurgy of steel. BOF production, theory, technology, construction aggregates, recycling of materials and ecology. Textbook]. O. G. Velichko, B. M. Bojchenko, P. S. Harlashin ta insh. Dnipropetrovs'k: RVA «Dnipro-val» Publ., 2015, 434 p.
4. **Zajcev A. I., Mogutnov B. M., Shahpazov E. H.** *Fizicheskaja himija metallurgicheskikh shlakov* [Physical chemistry of metallurgical slags]. Moscow, Interkontakt Nauka Publ., 2008, 352 p.
5. **Kulik A. D., Kashheev M. A., Pohvalityj A. A.** Sovershenstvovanie vypuska stali iz konvertera [Improving the production of steel from the converter]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' = Metallurgical and Mining Industry*, 2013, no. 1, pp. 18–20.
6. **Umanskij A. A., Chernysheva N. A.** Issledovanie vlijanija sostava ishodnoj metallicheskoj shihty na kachestvo konverternoj stali [Research of influence of composition of the initial metal charge on the quality of converter steel]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sekcii rossijskoj akademii estestvennyh nauk. Sbornik nauchnyh trudov = Journal of Mining and Metallurgy Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Proceedings*. Moskva-Novokuzneck, 2010, no. 25, pp. 42–47.
7. **Kudrin V. A.** *Teorija i tehnologija proizvodstva stali* [The theory and technology of steel production]. Moscow. Mir, OOO «Izdatel'stvo AST» Publ., 2003, 528 p.
8. **Dobuzhskaja A. B., Galicyn G. A., Belokurova E. V.** Novye tehnologii i materialy v metallurgii. *Sb. nauch. Trudov = New technologies and materials in the industry. Coll. scientific. Works*. Ekaterinburg, UrO RAN, 2010, pp. 307–318.
9. **Okorokov B. N., Komolova O. A., Grigorovich K. V.** Fiziko-himicheskoe opisanie vzaimodejstvija komponentov v sisteme shlak-metal [Physical and chemical description of the interaction of the components in the system of the slag-metal]. *Mezhdunarodnaja nauchnaja konferencija «Fiziko-himicheskie osnovy metallurgicheskikh processov», posvjashhennaja 110-letiju so dnja rozhdenija akademika A. M. Samarina. Sbornik materialov. = International Scientific Conference «Physical and chemical bases of metallurgical processes», dedicated to the 110th anniversary of the birth of Academician A. M. Samarin. Collection of materials*, 2012, p. 47.