

## Организация управления конвертерной плавкой

*Рассмотрены методы контроля процесса продувки ванны конвертера. Исследованы погрешности и неточности методов контроля обезуглероживания ванны с обратной связью по ходу продувки. Установлено, что для повышения точности контроля скорости обезуглероживания и температуры ванны целесообразно использовать тепловые характеристики водоохлаждаемых элементов.*

**Ключевые слова:** конвертер, продувка, обезуглероживание, точность.

**В**ведение. Физико-химическую основу производства стали в конвертере составляют процессы окисления примесей чугуна, в первую очередь углерода. Современный уровень развития измерительной техники не позволяет осуществить в агрессивной, высокотемпературной, химически реагирующей среде прямой контроль скоростей протекания физико-химических процессов, определяющих управляемые характеристики объекта – массовые доли элементов в металле и шлаке, их температуру [1].

Разовый прямой контроль состояния ванны с помощью измерительных погружаемых зондов является лишь корректировочным инструментом для различных методов контроля процесса и управления им [2]. Корректировка производится в последние минуты продувки и направлена на получение заданной марки стали. При этом весь процесс продувки производится по заданной программе и практически не контролируется. В силу больших колебаний начальных (масса и химический состав металлической части шихты, ее температура, насыпная масса лома) и конечных (заданная марка стали, температура металла на выпуске) параметров плавки, программы оказываются неэффективными и во многих случаях приводят к необходимости корректировки плавки после окончания продувки [3].

Моментом окончания продувки является достижение заданного маркой стали содержания углерода. При этом температура металла, определяемая температурным режимом плавки, и содержание серы, определяемое режимом шлакообразования, должны также соответствовать требованиям получения заданной марки стали. Таким образом, непрерывный контроль режима обезуглероживания позволит управлять температурным режимом и режимом шлакообразования ванны конвертера с целью одновременного достижения заданных маркой конечных параметров металла.

Несмотря на большое количество исследований, направленных на контроль процесса обезуглероживания [4-6], до настоящего времени отсутствует концептуальное решение этого вопроса, что снижает точность контроля.

Работа выполнена в НТУУ «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского» по теме «Управление конвертерной плавкой в условиях не-

полной информации о начальных и конечных условиях продувки», Государственный регистрационный номер 0114U005002.

**Постановка задачи исследований.** Целью исследований является повышение точности контроля процесса продувки ванны конвертера.

**Результаты исследований.** Наиболее эффективным методом контроля процесса обезуглероживания является контроль по составу газовой фазы. Именно первым косвенным методом определения обезуглероживания ванны с обратной связью по ходу продувки был способ, основанный на непрерывном определении химического состава и расхода отходящего газа. Автоматическое измерение этих параметров позволяет с некоторым запаздыванием определить: скорость окисления углерода в конвертере, степень использования кислорода на окисление углерода и на реакции шлакообразования, объемную долю CO и CO<sub>2</sub> в газовой фазе конвертера [7].

Основная трудность осуществления этого метода заключается в создании надежной и долговечной системы отбора пробы газа. Газ отбирается в характерной точке подъемного газохода охладителя конвертерных газов (ОКГ), где произошло перемешивание компонентов. Минимальная длина пути, на котором происходит полное молярное перемешивание отходящего газа, равна десятикратному диаметру горловины конвертера. Затем газ пропускается через фильтр и поступает в камеру пробоподготовки. Охлажденный и очищенный газ проходит через систему запуска масс-спектрометра. На основании результатов анализа отходящего газа на CO, CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>, а также информации, поступающей от датчиков температуры и давления отходящего газа, с помощью ЭВМ автоматически рассчитывается скорость обезуглероживания, доля углерода и температура металла.

Основной трудностью применения этой системы является выбор точки отбора газа на анализ, так как возникает противоречие между обеспечением минимального запаздывания (точка отбора должна быть как можно ближе к началу газохода) и надежностью перемешивания компонентов газовой фазы, в том числе с подсасываемым воздухом (точка отбора должна быть в районе переходного газохода). Кроме того, возникают сложности с измерением расхода отходящего газа в точке отбора газа на химический

анализ. Практически расход измеряется в районе дымососа, при этом транспортное запаздывание между точками измерения составляет несколько десятков секунд.

Таким образом, несмотря на достаточно хорошую теоретическую составляющую метода, контроль процесса обезуглероживания присущи погрешности, связанные с транспортным запаздыванием. Также метод имеет недостаточную надежность, определяемую трудностью эксплуатации отборных устройств.

Как источник косвенной информации о ходе конвертерной плавки, авторами статьи использованы тепловые характеристики водоохлаждаемых элементов, тесно связанные как со скоростью обезуглероживания, так и с температурой ванны по ходу продувки.

Известно, что только около 10 % CO догорает в полости конвертера. От догорания в атмосферном кислороде продуктов неполного окисления углерода ванны, над горловиной конвертера образуется факел пламени. Индикаторами мощности этого тепловыделения может служить тепловоспринимающее водоохлаждаемое оборудование конвертерной установки – кислородная фурма, кессон, экраны газохода (ОКГ), работающие как теплообменные аппараты. С некоторым допущением можно принять, что поверхностная плотность теплового потока на фурме и кессоне или температурный напор (температура нагрева воды) при стабильном расходе охлаждающей воды пропорциональны мгновенному количеству сгорающего CO при соответствующих температурных условиях процесса. В свою очередь, расход CO в полости конвертера пропорционален скорости обезуглероживания ванны. Таким образом, тепловые характеристики фурмы и кессона косвенно отображают скорость окисления углерода в процессе продувки или с пересчетным коэффициентом – степень использования кислорода на окисление углерода.

Перепад температуры воды на фурме является комплексным параметром, отражающим взаимосвязанные процессы обезуглероживания и нагрева ванны. До тех пор, пока вспенивающийся шлак не достигнет фурмы, повышение температуры воды вызывается, главным образом, теплотой газа. При увеличении уровня шлака и перехода продувки в режим затопленной струи, повышается интенсивность теплообмена между металло-шлако-газовой эмульсией и фурмой. С этого момента температурный перепад воды в большей степени характеризует температуру металла.

Теплообмен между фурмой и ванной осуществляется за счет конвекции металло-шлако-газовой эмульсии:

$$q_{\phi} = \alpha_3(t - t_{\text{ст}}), \quad (1)$$

где  $q_{\phi}$  – поверхностная плотность теплового потока на стенку фурмы, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha_3$  – коэффициент теплоотдачи от эмульсии к омываемой стенке, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $(t - t_{\text{ст}})$  – соответственно, температура металла и наружной тепловоспринимающей поверхности стенки фурмы, °С.

Если учесть, что значение  $\alpha_3$  – в основном зависит от скорости обезуглероживания ванны и ее температуры, то формулу (1) можно представить в линейном виде:

$$q_{\phi} = a_1 + a_2 v_c + a_3 t, \quad (2)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты;  $v_c$  – скорость обезуглероживания ванны, %/мин.

Поверхностная плотность теплового потока от излучающего газа на стенку охладителя конвертерных газов (ОКГ) –  $q_k$ , Вт/м<sup>2</sup>, определяется по известному уравнению переноса:

$$q_k = C_s \varepsilon_3 \left[ \varepsilon_r \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - A_r \left( \frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где  $C_s$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,67 Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>);  $\varepsilon_3$  – эффективная степень черноты стенки ОКГ;  $\varepsilon_r$  – степень черноты газа, зависящая от его температуры, эффективной толщины и доли излучающих трехатомных компонентов;  $T_r, T_{\text{ст}}$  – температура газа и воспринимающей радиацию наружной поверхности стенки ОКГ, К;  $A_r$  – поглощающая способность газа.

Эффективная степень черноты стенки ОКГ определяется соотношением:

$$\varepsilon_3 = (\varepsilon_{\text{ст}} + 1)/2, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{\text{ст}}$  – степень черноты стенки ОКГ.

Температурой поверхности стенки ОКГ по сравнению с температурой излучающего газа в рамках инженерных расчетов можно пренебречь. Тогда формула (3) примет вид:

$$q_k = \beta \varepsilon_r T_r^4, \quad (5)$$

где  $\beta$  – постоянный коэффициент.

Температуру отходящего газа в ОКГ можно представить как сумму температуры ванны, с которой газ покидает конвертер, и ее приращения от дожига оксида углерода. Значение  $\varepsilon_r$ , несмотря на многофакторность зависимости, в первом приближении пропорционально скорости обезуглероживания ванны. С учетом этих допущений формулу (5) можно представить следующим образом:

$$q_k = v_c (a_4 + a_5 v_c + a_6 t), \quad (6)$$

где  $a_4, a_5, a_6$  – коэффициенты.

Скорость обезуглероживания и температуру ванны определяем из системы уравнений (2) и (6), преобразовав их к виду:

$$v_r = \beta_1 q_{\phi} - \beta_2 t, \quad (7)$$

$$t = \beta_3 \sqrt[4]{\frac{q_k}{v_c}} - \beta_4 v_c. \quad (8)$$

Для управления плавкой в процессе продувки формулы (7) и (8) дополнены выражениями для определения управляющих воздействий [8]:

$$m_{\text{охл}} = f(v_c, v_t, C, t), \quad (9)$$

$$H - \Delta H = f(v_c, v_t, C, t) \quad \text{при } t > t_3; \quad (10)$$

$$H + \Delta H = f(v_c, v_t, C, t) \quad t < t_3, \quad (11)$$

где  $H, \Delta H$  – соответственно, расстояние сопла фурмы до уровня спокойного металла и изменение этого расстояния, калибр;  $v_t$  – скорость изменения температуры ванны, °С/мин;  $C$  – содержание углерода в металле, %;  $t_3$  – заданное значение температуры ванны, определяемое как функция начальных (масса чугуна и лома, химсостав чугуна, номер плавки по кампании футеровки конвертера, продолжительность простоя конвертера и др. [9]) и заданных (марка стали, основность шлака и др. [10]) условий продувки, а также содержания углерода в ванне, °С.

Стабилизация дутьевого режима достигается поддержанием эффективного расхода дутья:

$$v_3 = \frac{376\sqrt{p}}{3070 + H + N - \frac{9470}{10,6 + 0,0262N - 14,5m}}, \quad (12)$$

где  $v_3$  – эффективный расход дутья, м³/мин;  $p$  – давление дутья, Па;  $N$  – номер плавки по кампании футеровки;  $m$  – металлическая садка, равная сумме массы чугуна и лома, т.

Реализация представленной математической модели осуществляется устройством (рис. 1, 2). В процессе продувки конвертерной плавки информация о тепловом потоке на фурму 14  $q_{\phi}$  поступает с датчика 17, представляющего собой дифференциальную термопару [11], в блок измерения теплового потока 4. С выходного преобразователя блока 4 сигнал поступает на делитель напряжения, представляющий собой переменный резистор. Таким образом, с выхода блока 4 снимается напряжение, пропорциональное выражению  $q_{\phi}$ . Выходной сигнал блока 4 поступает в противофазе с напряжением преобразователя П2 блока 1 указания температуры ванны конвертера 19. Делитель напряжения на выходе П2 позволяет получить напряжение, пропорциональное выражению  $\beta_2 t / \beta_1$ . Разность сигналов блоков 1 и 4 поступает на компенсирующий преобразователь П5 блока 2 указания скорости обезуглероживания ванны, в качестве которого используется вторичный прибор. Таким образом, после об-

работки суммарного сигнала преобразователя П3, П4 и П5 блока 2 устанавливаются в положение, соответствующее величине  $v_3$ .

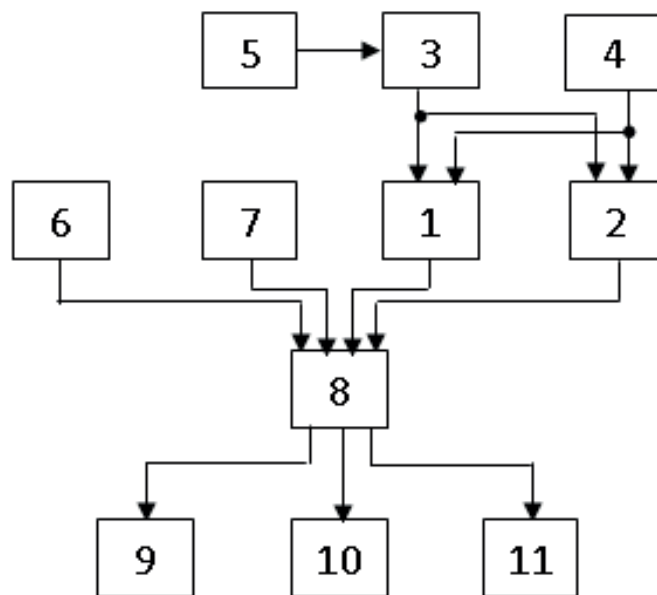


Рис. 1. Функциональная блок-схема устройства

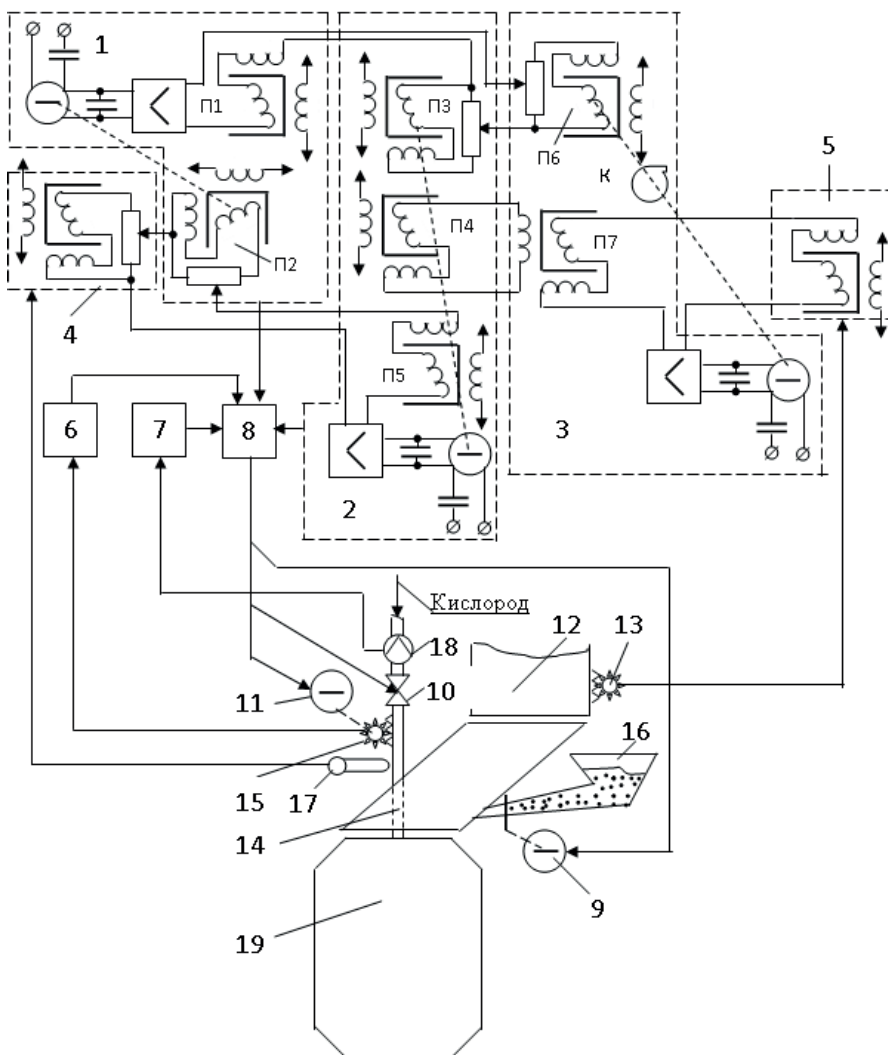


Рис. 2. Схема пояснения работы устройства на примере выполнения на магнитоэлектрической аппаратуре

Напряжение, пропорциональное тепловому потоку на ОКГ 12, измеряемому по термическому удлинению его подъемной части, поступает с датчика 13, показания которого изменяются по тем же теплофизическим закономерностям, что и тепловой поток на ОКГ  $q_k$  (см. формулу (6)) в блок 5 измерения. С выходного преобразователя блока 5 напряжение поступает на компенсирующий преобразователь П7 блока 3 деления. На обмотку возбуждения преобразователя П7 поступает с преобразователя П4 блока 2 напряжение, пропорциональное  $v_c$ . Таким образом, положение плунжера преобразователя П7 соответствует отношению  $q_k / v_c$ . Положение преобразователя П6 блока 3, связанного с двигателем через кулачок с профилем, соответствующего корню четвертой степени, пропорционально выражению  $\sqrt[4]{q_k / v_c}$ . Делитель напряжения на выходе П6 позволяет получить сигнал, пропорциональный выражению  $\sqrt[4]{q_k / v_c} / \beta_3$ .

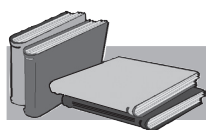
Выходной сигнал блока 3 деления суммируется в противофазе с сигналом преобразователя П3 и поступает в блок 1 на компенсирующий преобразователь П1. Таким образом, выходной сигнал преобразователей П1 и П2 блока 1 пропорционален величине  $t$ . Напряжения, пропорциональные температуре  $t$  и скорости обезуглероживания  $v_c$ , соответственно от блоков 1 и 2, поступают в вычислительный блок 8. В блоке 8 по начальным и заданным условиям продувки, а также информации о содержании углерода в ванне определяется заданное текущее значение температуры ванны  $t_3$ . Последняя величина сравнивается с температурой ванны  $t$ , поступающей из блока 1, в случае горячего хода процесса ( $t > t_3$ ) согласно выражению (9) производится расчет и подача охлаждающих материалов приводом 9 весов дозаторов 16 или опускание фурмы 14 воздействием на ее привод 11, согласно выражению (10), а в случае холодного хода процесса ( $t < t_3$ ) – подъем фурмы, согласно выражению (11).

Одновременно с изменением положения фурмы изменяется расход дутья исполнительным механизмом 10 регулирования расхода дутья, с целью сохранения неизменным эффективного расхода дутья по формуле (12). Информация о давлении дутья для определения эффективного расхода дутья поступает в вычислительный блок 8 из блока 7 измерения расхода дутья, который соединен с датчиком 18, а информация о расстоянии фурмы – до уровня спокойного металла от блока измерения 6, который соединен с датчиком 15.

Использование измерения термического удлинения подъемной части ОКГ уменьшает составляющую погрешности, обусловленную влиянием запыленности, настыеобразования и накипи водоохлаждаемых элементов ОКГ. В результате повышается точность управления конвертерной плавкой, что увеличивает количество плавов, выпускаемых с первой повалки конвертера, и уменьшает расход огнеупоров на плавку.

## Выводы

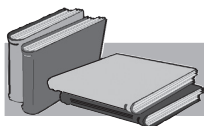
Тепловые потоки на водоохлаждаемые элементы конвертерной установки (фурмы и ОКГ) определяются скоростью обезуглероживания и температурой ванны конвертера и позволяют в процессе продувки непрерывно определять эти параметры. Сравнительно простые устройства для измерения тепловых потоков (дифференциальная термопара для измерения теплового потока на фурму) и датчик удлинения подъемной части газохода (для измерения теплового потока на ОКГ) позволяют осуществить контроль выходных параметров процесса с высокой точностью. Управление конвертерной плавкой целесообразно осуществлять изменением дутьевого режима плавки и вводом охлаждающих материалов.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Металургія сталі. Конвертерне виробництво. Теорія, технологія, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія. Підручник. / О. Г. Величко, Б. М. Бойченко, П. С. Харлашин та інш. – Дніпро: РВА «Дніпро» - ВАЛ, 2015. – 434 с.
2. *Sharbatian M., Bogushevskiy V., Sukhenko V.* System for the BOF Process Control // The advanced Science open access Journal. – Vol. 5. – 2013. – P. 23–27.
3. *Комолова О. А., Огороков Б. Н., Григорович К. В.* Моделирование взаимодействия компонентов шлаковой и металлических фаз при производстве стали. // Труды XIII конгресса сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Трубная металлургическая компания». – 2013. – С. 118–122.
4. Создание базовой интегральной динамической модели современных конвертерных процессов на основе законов неравновесной термодинамики. Сообщение 1. / Б. Н. Огороков, П. Ю. Шендриков, О. А. Комолова, В. Г. Поздняков // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2010. – № 5. – С. 31–37.
5. *Уманский А. А., Чернышева Н. А.* Исследование влияния состава исходной металлической шихты на качество конвертерной стали // Вестник горно-металлургической секции российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. – Москва-Новокузнецк. – 2010. – Вып. 25. – С. 42–47.
6. *Кулик А. Д., Кащеев М. А., Похвалитый А. А.* Совершенствование выпуска стали из конвертера // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 1. – С. 18–20.
7. *Egorov K., Bogushevskiy V.* Investigation of electrophysical properties of smelting products and their connection with engineering process // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 109–114.

8. Богусhevский В. С., Жук С. В., Мельник С. Г., Зубова Е. Н. Замкнутая система управления кислородно-конвертерной плавкой // Литье и металлургия. – 2013. – № 3 (72). – С. 207–211.
9. Богусhevский В. С., Горбачова М. В. Режим добавок при продувке конвертерной ванны / Сучасні проблеми зварювання та споріднених технологій. – К.: ТОВ «НВП інтерсервіс», 2016. – С. 212–225.
10. Bogushevsky V., Skachok A. The influence of uncontrolled disturbance actions on control of converter melting // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – № 5. – С. 128–133.
11. Богусhevский В. С., Шевченко М. А., Вовк В. В. Устройство для контроля теплового потока // X Международная научно-практическая конференция «Литье-2014», 27 – 28 мая 2014 г., Запорожье. – С. 25–26.



## REFERENCES

1. Velychko O. H., Boichenko B. M., Kharlashyn P. S. et al. (2015). Metalurhiia stali. Konverterne vyrobnytstvo. Teoriia, tekhnolohiia, konstruktsii ahrehativ, retsykuliatsiia materialiv i ekolohiia. Pidruchnyk. [*Metallurgy of steel. BOF production. The theory, technology, construction aggregates, recycling of materials and ecology*] RVA Dnipro – Val, 434 p. [in Ukrainian].
2. Sharbatian M., Bogushevskiy V., Sukhenko V. (2013). System for the BOF Process Control. The advanced Science open access Journal, vol. 5, pp. 23–27 [in English].
3. Komolova O. A., Okorokov B. N., Grigorovich K. V. (2013). Modelirovanie vzaimodeistviia komponentov shlakovoi i metallicheskih faz pri proizvodstve stali [*Modeling of the interaction of components of the slag and metal phases in steelmaking*]. Trudy XIII kongressa staleplavil'shchikov, OAO «Trubnaia metallurgicheskaia kompaniia», pp. 118–122 [in Russian].
4. Okorokov B. N., Shendrikov P. Yu., Komolova O. A., Pozdniakov V. G. (2010). Sozdanie bazovoi integral'noi dinamicheskoi modeli sovremennykh konverternykh protsessov na osnove zakonov neravnovesnoi termodinamiki [*Creation of basic integrated dynamic model of modern BOF processes based on non-equilibrium thermodynamic laws*]. Soobshhenie 1. Izvestiia vysshchych uchebnykh zavedenii. Chernaia metallurgii, no. 5, pp. 31–37 [in Russian].
5. Umanskii A. A., Chernysheva N. A. (2010). Issledovanie vliianiia sostava iskhodnoi metallicheskoii shikhty na kachestvo konverternoi stali [*Investigation of the influence of the composition of the initial metallic charge on the quality of converter steel*]. Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii: Sbornik nauchnykh trudov, vyp. 25, pp. 42–47 [in Russian].
6. Kulik A. D., Kashcheev M. A., Pokhvalityi A. A. (2013). Sovershenstvovanie vypuska stali iz konvertera [*Improvement of the output of steel from the BOF*]. Metallurgicheskaia i gornorudnaia promyshlennost', no. 1, pp. 18–20 [in Russian].
7. Egorov K., Bogushevskiy V. (2015). Investigation of electrophysical properties of smelting products and their connection with engineering process. Metallurgical and Mining Industry, no. 1, pp. 109–114 [in Russian].
8. Bogushevskii V. S., Zhuk S. V., Mel'nik S. G., Zubova E. N. (2013). Zamknutaia sistema upravleniia kislorodno-konverternoi plavkoi [*Closed-loop control system for BOF melting*]. Lit'e i metallurgii, no. 3 (72), pp. 207–211 [in Russian].
9. Bogushevskii V. S., Gorbachova M. V. (2016). Rezhim dobavok pri produvke konverttrnoi vannы [*The regime of additives when blowing the BOF bath*]. Suchasni problemy zvarivannia ta sporidnenykh tekhnologii. Kiev: TOV «NVP interservis», pp. 212–225 [in Russian].
10. Bogushevsky V., Skachok A. (2016). The influence of uncontrolled disturbance actions on control of converter melting. Metallurgical and Mining Industry, no. 5, pp. 128–133 [in English].
11. Bogushevskii V. S. Shevchenko M. A., Vovk V. V. (2014). Ustroistvo dlia kontroliia teplovogo potoka [*Device for monitoring heat flow*]. X Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia «Lit'e-2014», Zaporozh'e, pp. 25–26 [in Russian].

### Анотація

Богусhevський В. С., Сухенко В. Ю.

Організація керування конвертерною плавкою

Розглянуто методи контролю процесу продувки ванни конвертера. Досліджено похибки та неточності методів контролю зневуглицювання ванни зі зворотним зв'язком протягом продувки. Встановлено, що для підвищення точності контролю швидкості зневуглицювання і температури ванни доцільно використовувати теплові характеристики водоохолоджуючих елементів.

### Ключові слова

Конвертер, продувка, зневуглицювання, точність.

---

**Summary**

*Bogushevskii V., Sukhenko V.*  
Arrangement control of BOF melting

*Methods for controlling the blowing process in the BOF are considered. The errors and inaccuracies of control methods of decarburization of a bath with feedback at blowing are investigated. It is determined that to improve the accuracy of controlling the decarburization rate and bath temperature, it is expedient to use the thermal characteristics of water-cooled elements.*

---

**Keywords**

*BOF, blowing, decarburization, accuracy.*

---

Поступила 13.04.17