

DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-7  
УДК 669.187.66.045

© Степанов В.А., Крахт Л.Н., Меркер Э.Э.,  
Ершов Е.В., Королькова Л.Н., 2018

**Степанов Виктор Александрович**  
Инженер, СТИ НИТУ "МИСиС"  
(Старый Оскол, Россия)  
E-mail: Viktor1990\_31@mail.ru

**Stepanov Viktor Aleksandrovich**  
Engineer, STI NITU "MISiS"  
(Stary Oskol, Russia)  
E-mail: Viktor1990\_31@mail.ru

**Крахт Людмила Николаевна**  
Кандидат технических наук, доцент,  
СТИ НИТУ "МИСиС"  
(Старый Оскол, Россия)  
E-mail: lkrakht@mail.ru

**Krakht Lyudmila Nikolaevna**  
PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
STI NITU "MISiS" (Stary Oskol, Russia)  
E-mail: lkrakht@mail.ru

**Меркер Эдуард Эдгарович**  
Доктор технических наук, профессор,  
СТИ НИТУ "МИСиС"  
(Старый Оскол, Россия)  
E-mail: merker@inbox.ru

**Merker Eduard Edgarovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor,  
STI NITU "MISiS"  
(Stary Oskol, Russia)  
E-mail: merker@inbox.ru

**Ершов Евгений Валентинович**  
Доктор технических наук, профессор,  
Череповецкий государственный университет  
(Череповец, Россия)  
E-mail: ershov\_ev@mail.ru

**Ershov EvgenyValentinovich**  
Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Cherepovets State University  
(Cherepovets, Russia)  
E-mail: ershov\_ev@mail.ru

**Королькова Лариса Николаевна**  
Кандидат технических наук, доцент,  
СТИ НИТУ "МИСиС"  
(Старый Оскол, Россия)  
E-mail: klnchayka@mail.ru

**Korolkova Larisa Nikolaevna**  
PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
STI NITU "MISiS"  
(Stary Oskol, Russia)  
E-mail: klnchayka@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
МЕТОДА ЛОКАЛЬНО  
РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДОЖИГАНИЯ  
ГОРЮЧИХ ГАЗОВ В ДУГОВОЙ  
ПЕЧИ**

**THE RESEARCH AND  
DEVELOPMENT OF A METHOD OF  
LOCALLY DISTRIBUTED  
AFTERBURNING OF COMBUSTIBLE  
GASES IN THE ARC FURNACE**

---

**Аннотация.** Исследование провели в условиях электроплавки железорудного металлизированного сырья (ЖМС) в дуговой печи [1], [3]. На основе проведенных исследований разработан новый метод локально распределенного дожигания горючих газов в дуговой печи, заключающийся в том, что ЖМС подают через полые (трубчатые) графитированные электроды в ванну дуговой печи. Интенсификацию процессов плавки металлизированных окатышей осуществляют с помощью топливно-кислородных горелок (ТКГ), по-

---

**Abstract.** The study was conducted under the conditions of the electric smelting of metallized raw materials in an arc furnace [1], [3]. On the basis of studies a new locally distributed method of afterburning of combustible gases in arc furnaces has been developed, namely, the fog is fed through a hollow (tubular) graphite electrodes in the bath arc furnace. Intensification of processes of melting of the metallised pellets is carried out using fuel – oxygen burners, which allows to affect the processes of afterburning of combustible gases in an electric arc furnace

---

звляющих воздействовать на процессы дожигания горючих газов в дуговой печи над шлаком [2]. Полученные результаты по дожиганию горючих газов позволили ускорить процессы нагрева и плавления железорудного металлizedанного сырья, а также повысить теплотехнические показатели электроплавки металлizedанных окатышей в дуговой печи. Описывается алгоритм системы оценки технологических показателей плавки железорудного металлizedанного сырья при использовании метода локально распределенного дожигания горючих газов в дуговой печи.

**Ключевые слова:** дуговая печь, дожигание, водоохлаждаемые кольца, кислородная фурма, окатыши, шлак, отходящие газы

above the slag [2]. The results obtained for the afterburning of combustible gases allowed to accelerate the process of heating and melting of the metallized iron ore raw materials and also improve thermal indicators of electric smelting of steel in an arc furnace. The algorithm of evaluation system of technological indicators of smelting of iron ore metallized raw materials when using the method of locally distributed afterburning of combustible gases in the arc furnace is described.

**Keywords:** arc furnace, reheat, the water-cooled ring, oxygen lance, pellets, slag, waste gases

### Введение

В связи с постоянным требованием повышения эффективности процессов производства стали все более важное значение приобретает повышение производительности печи, совершенствование тепловой работы и технологии электроплавки, автоматизации процесса.

Продувка ванны кислородом в дуговых печах является наиболее существенным резервом повышения эффективности производства стали, так как при этом в значительной степени интенсифицируются тепло-массообменные процессы, происходящие между металлом, шлаком и атмосферой рабочего пространства агрегата.

Цель работы состоит в разработке нового метода локально распределенного дожигания горючих газов в дуговой печи при помощи топливно-кислородных горелок и кислородной фурмы.

### Основная часть

Современный технологический процесс электроплавки железорудного металлizedанного сырья в сталеплавильном агрегате предусматривает проведение в окислительный период интенсивной продувки сталеплавильной ванны кислородом с помощью продувочной фурмы или с применением топливно-кислородных горелок [1]. Исследованиями в работе [6] установлены температурные условия в подсводовом пространстве дуговой печи, из которых следует, что максимальная температура в сверхмощных дуговых печах достигает 2000 °С и более, а это обстоятельство указывает на возможность протекания обратной реакции, т.е. идет процесс восстановления двуокиси углерода:  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$  и повышается содержание  $\text{CO}_2$  в отходящих газах при возможности снижения стойкости футеровки [6]. В этой связи представляется важным осуществление дожигания горючих газов в ванне дуговой печи над шлаком или в других зонах агрегата. Эффективность дожигания отходящих газов над шлаком осуществляется режимом подачи кислорода через ТКГ [1], [3].

На рис. 1 приведена схема дуговой печи при электроплавке железорудного металлizedанного сырья с использованием метода локально распределенного дожигания горючих газов.

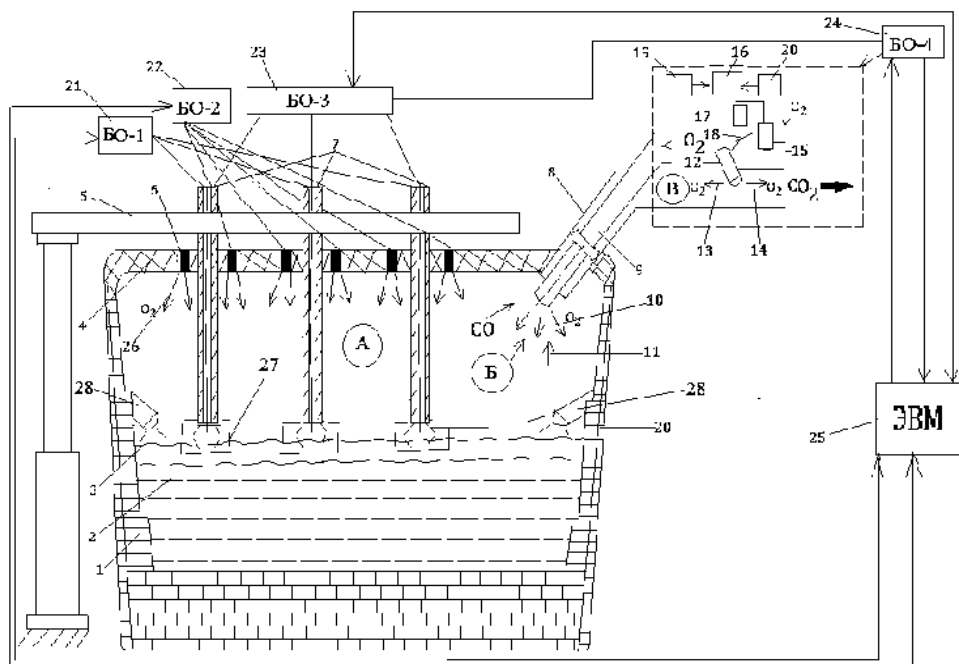


Рис. 1. Схема дуговой печи при электроплавке железорудного металлизированного сырья с использованием метода локально распределенного дожигания горючих газов: А, Б, В – 1, 2, 3 технологические зоны; 1 – дуговая печь; 2 – жидкий металл; 3 – жидкий шлак; 4 – съемный огнеупорный свод дуговой печи; 5 – электрододержатель печи; 6 – водоохлаждаемые кольца с отверстиями для подачи кислорода; 7 – три полых (трубчатых) графитированных электрода; 8 – газоход для отвода газов из дуговой печи; 9 – устройство для дожигания горючих газов перед газоходом с газоотводящим трактом в своде дуговой печи; 10 – струи кислорода на дожигание СО до  $\text{CO}_2$ ; 11 – горючие газы перед газоходом печи; 12 – устройство для дожигания горючих газов в газоходе дуговой печи; 13 – противочочные струи кислорода; 14 – спутные струи кислорода; 15 – датчик расхода кислорода; 16 – регулятор расхода кислорода; 17 – исполнительный механизм; 18 – регулирующий орган; 19 – программный регулятор; 20 – электрические дуги от полых (трубчатых) графитированных электродов; 21 – блок оценки электрического режима плавки стали; 22 – блок оценки процесса подачи кислорода через водоохлаждаемые кольца с отверстиями; 23 – блок оценки процесса подачи через полые (трубчатые) графитированные электроды в металл и шлак металлизированных окатышей, извести, раскислителей, ферросплавов и других сыпучих и мелкораздробленных материалов от бункеров; 24 – блок оценки работы устройства дожигания горючих газов перед газоходом и в самом газоходе с контролем степени их дожигания; 25 – ЭВМ; 26 – подача кислорода через водоохлаждаемые кольца; 27 – диаметр распада электродов; 28 – топливно-кислородные горелки

Особенностью данного метода является то, что дожигание горючих газов происходит в трех зонах рабочего пространства дуговой печи (см. рис. 1). В технологической зоне А дожигание горючих газов, поднимающихся над поверхностью зоны плавления, равной диаметру распада электродов (27), осуществляется встречными струями кислорода, вытекающими из сопел водоохлаждаемых колец (6), находящихся в своде дуговой печи (рис. 1), а оставшаяся часть горючих газов дожигается в подсводовом пространстве [4], [8]. В других технологических зонах (зоны Б и В) дожигание предусматривается осуществлять с помощью устройств в виде многосопловых фурм [3]. Для проведения плавки железорудного металлизированного сырья в

дуговой печи металлошихта превращается в жидкий металл (2) за счет подогрева и расплавления шихты электрическими дугами (20) от полых (трубчатых) графитированных электродов (7) в своде печи (4), закрепленные электрододержателями сталеплавильного агрегата (5), а также за счет топливно-кислородных горелок (28). При этом за счет подачи шлакообразующих материалов (извести, плавикового шпата и других), т.е. в дуговой печи над металлошихтой, образуется жидкий шлак (3), который по ходу плавки ЖМС периодически скачивается, а с появлением жидкого металла (2), через находящиеся в своде дуговой печи водоохлаждаемые кольца с отверстиями (6), происходит подача кислорода (26) навстречу отходящим из сталеплавильной ванны газам с целью более быстрого нагрева и плавления ЖМС (рис. 1).

В это же время осуществляется продувка жидкого расплава кислородом от устройства для дожигания горючих газов перед газоходом с газоотводящим трактом в своде агрегата (9). В окислительный период плавки стали на жидкий металл (2) через полые (трубчатые) графитированные электроды (7) осуществляется непрерывная подача металлизированных окатышей, извести и других сыпучих материалов, причем в это же время из сталеплавильной ванны дуговой печи выделяются горючие газы (СО, Н<sub>2</sub> и др.), которые направляются в газоход для отвода газов из дуговой печи (8), перед которым осуществляется дожигание этих газов (11) струями кислорода (10) от устройства (9), а источником выделения отходящих (11) газов является кислород (10) дутья от многосопловой водоохлаждаемой кислородной фурмы (9) и от электрических дуг (20), где расплавляются металлизированные окатыши [9].

Для оценки технологических процессов плавки стали в дуговой печи используется ЭВМ (25), которая функционально взаимодействует с блоком оценки электрического режима (21) (БО-1), блоком оценки процесса подачи кислорода на дожигание (22) через сопла водоохлаждаемых колец с отверстиями (БО-2), блоком оценки подачи через полые (трубчатые) графитированные электроды (23) в металл и шлак металлизированных окатышей, извести, раскислителей, ферросплавов и других сыпучих и мелкораздробленных материалов от бункеров дуговой печи (БО-3), блоком оценки работы устройства дожигания горючих газов (24) перед газоходом и в самом газоходе с контролем степени их дожигания (БО-4).

Скорость обезуглероживания сталеплавильной ванны при плавлении металлизированных окатышей<sup>1</sup>, % [С]/мин, оценивается по формуле [1], [5]:

$$v_c = v_{c1} + v_{c2} + v_{c3} + v_{c4}, \quad (1)$$

где  $v_{c,1}$  – скорость окисления углерода в объеме металла на поверхности пузырьков СО;  $v_{c,2}$  – скорость окисления углерода на границе раздела шлак-металл;  $v_{c,3}$  – скорость окисления углерода кислородом дутья от топливно-кислородных горелок;  $v_{c,4}$  – скорость поступления углерода (науглероживателя) металла за счет подачи ЖМО в ванну печи.

При плавлении ЖМС выделяется СО, м<sup>3</sup>/с, объем которого определяется по следующей формуле [2], [7]:

$$V_{CO} = \frac{28/12(v_c \cdot M_{mc} + v_{ок} \cdot [C]_{реакц})}{60 \cdot 100 \rho_{CO}}, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Меркер Э.Э. и др. К вопросу о механизме обезуглероживания металла и образования оксида углерода в дуговой печи // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2017. №3. С. 181–184.

где  $M_{Me}$  – масса металла, кг;  $v_{ок}$  – скорость загрузки окатышей, кг/мин;  $[C]_{реакц}$  – содержание углерода в металле, идущий на довосстановление оксидов железа (FeO), %;  $\rho_{CO}$  – плотность пузырька CO, кг/м<sup>3</sup>.

Для дожигания этого объема горючего газа CO требуется подача кислорода, общий расход которого оценивается по выражению, м<sup>3</sup>/с [1], [10]:

$$I_{O_2, об}^{дож} = 0,5 \cdot V_{CO}, \quad (3)$$

где 0,5 – эмпирический коэффициент [3].

Затем находили тепло, поступающее на шлак, Вт/м<sup>2</sup>, от струй дожигания CO [3], [7]:

$$Q_{CO}^{дож} = \alpha_{ж} \cdot \gamma \cdot (t_{cp(CO)} - t_{шл}) \cdot S_{ш.м.}, \quad (4)$$

где  $\alpha_{ж}$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $t_{cp(CO)}$  и  $t_{шл}$  – температуры соответственно поверхности факела дожигания CO и шлака, °C;  $S_{ш.м.}$  – поверхность теплоотдачи, м<sup>2</sup>;  $\gamma = 50\text{--}75\%$  – коэффициент, характеризующий долю тепла от дожигания CO, поступающего на нагрев шлаковой ванны.

При этом степень дожигания выделяемого CO из ванны дуговой печи находили по следующему выражению [1], [3]:

$$\theta = 1 - \{CO\}_{\infty} / \{CO\}_0, \quad (5)$$

где  $\{CO\}_0$  и  $\{CO\}_{\infty}$  – начальная и конечная концентрации CO в отходящих газах, %.

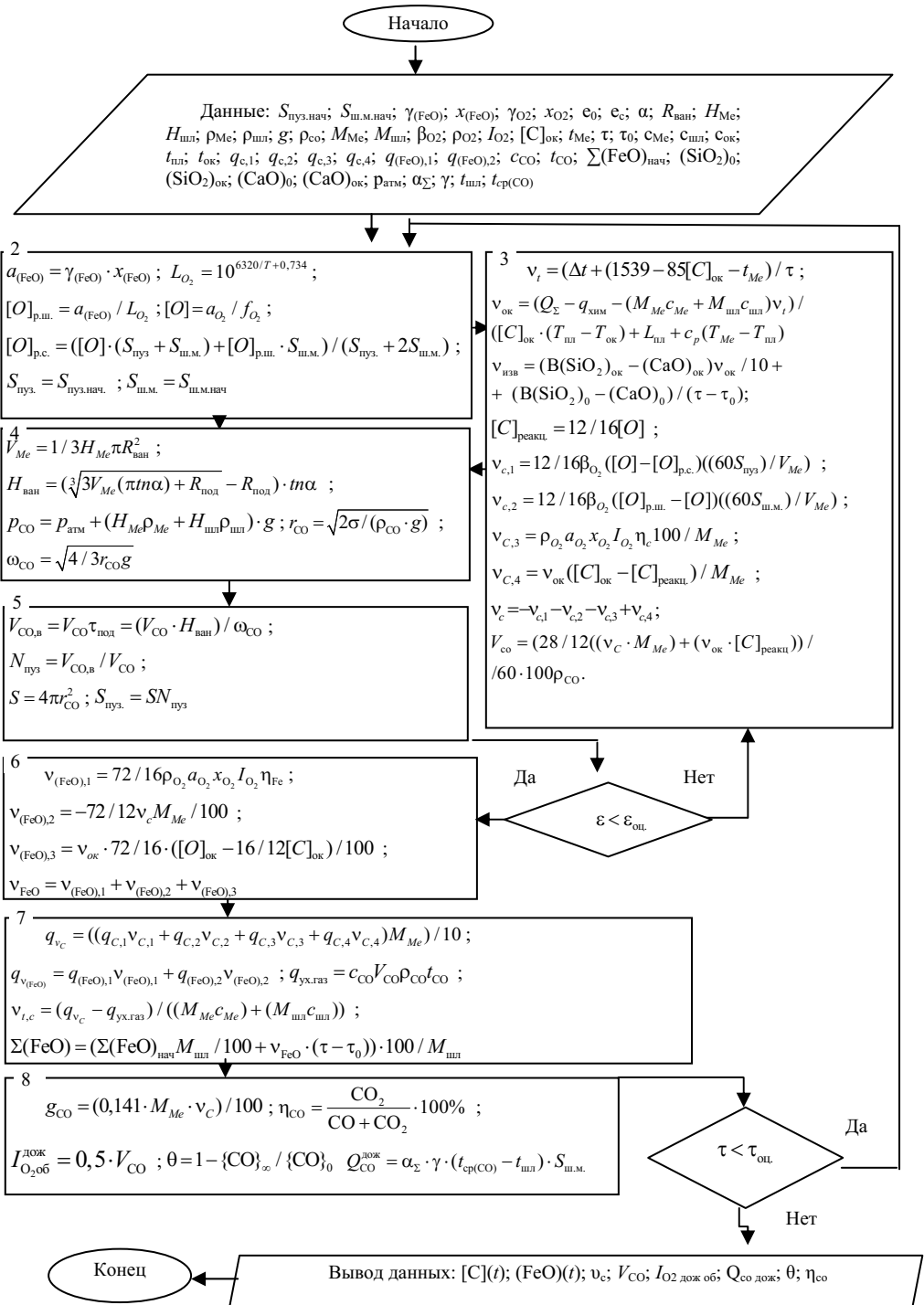
Общий коэффициент дожигания горючих газов, %, на выходе из печи оценили по формуле (6) [1], [3]:

$$\eta_{CO} = CO_2 / (CO + CO_2). \quad (6)$$

В результате полученных математических выражений (1)–(6) предложен алгоритм системы оценки технологических параметров плавки железорудного металлизированного сырья с использованием метода локально распределенного дожигания горючих газов, на основе которого реализована программа на алгоритмическом языке MATLAB. Для примера оценки по данному алгоритму (рис. 2) приняли данные более 100 паспортов плавков 150-тонной дуговой печи [1].

Оценка осуществлялась в следующей последовательности. В начале задали исходные данные: температура, масса и состав металла и шлака, интенсивность подачи кислорода дутья, теплофизические параметры и тепловые эффекты рассчитываемых реакций (блок 1).

Из текущей температуры определяем константы реакций и коэффициент распределения кислорода между металлом и шлаком (блок 2). Полученные данные используем для оценки равновесных содержаний кислорода в металле. Далее определяем скорость нагрева по текущим значениям температуры и содержания углерода в ванне, затем оцениваем скорость загрузки окатышей и извести, скорость окисления углерода в ванне дуговой печи при электроплавке ЖМС и объем образующегося CO (блок 3). Также задаем первое приближение величин поверхностей «шлак – металл» и пузырей в ванне.



Да

Нет

$\tau < \tau_{\text{отл.}}$

Конiec

Вывод данных:  $[\text{C}](t)$ ;  $(\text{FeO})(t)$ ;  $v_c$ ;  $V_{\text{CO}}$ ;  $I_{\text{O}_2}$  дож об;  $Q_{\text{CO}}$  дож;  $\theta$ ;  $\eta_{\text{CO}}$

Рис. 2. Алгоритм системы оценки технологических параметров плавки железорудного металлизированного сырья с использованием метода локально распределенного дожигания горючих газов

Исходя из равновесных содержаний кислорода и реакционных поверхностей, оцениваем параметры пузырька CO (блок 4) и объем выделившегося из ванны газа (блок 5). Если разница заданных и оцениваемых значений больше заданной погрешности, то оценку обезуглероживания повторяем. Когда погрешность удовлетворяет заданным условиям, то сначала оцениваем скорости поступления (FeO) в шлак (блок 6), а затем скорость нагрева шлако-металлического расплава от обезуглероживания металла в дуговой печи (блок 7). Далее осуществляется оценка коэффициента дожигания CO ( $\eta_{CO}$ ), массового расхода CO ( $g_{CO}$ ), общего расхода кислорода на дожигание горючих газов ( $I_{O_2,об}^{дож}$ ), степени дожигания горючих газов в локальной зоне дуговой печи, а также тепла, идущего на шлак при дожигании CO ( $Q_{CO}^{дож}$ ), которые представлены в блоке 8. После чего проводим проверку, если текущее время  $\tau$  меньше оценочного  $\tau_{оц}$ , то переходим к оценке следующего промежутка времени, иначе – выводим конечные данные (блок 9).

Результаты оценки приведены на рис. 3, в котором представлены графики зависимости степени дожигания CO струями кислорода и общего коэффициента дожигания от общего расхода кислорода на дожигание CO при различных содержаниях горючих газов.

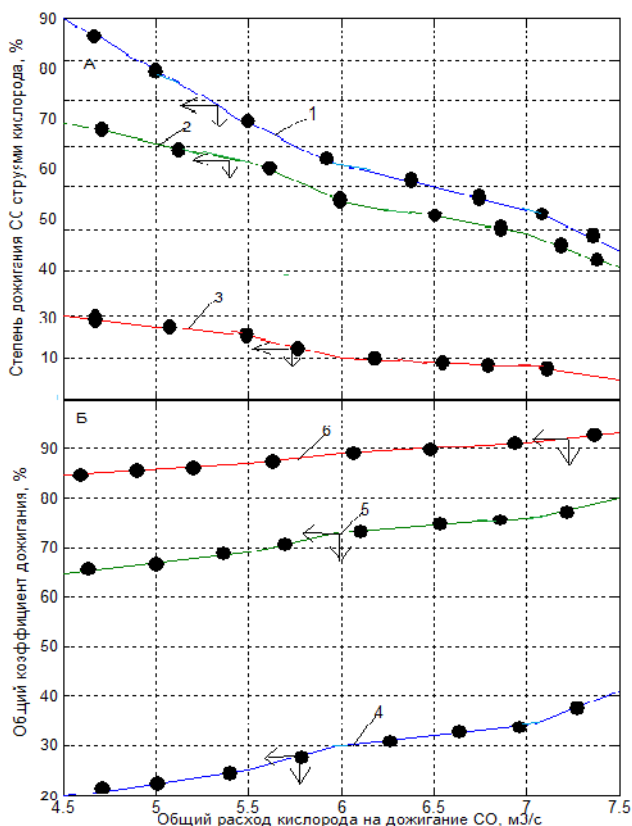


Рис. 3. Графики зависимостей степени дожигания CO струями кислорода (а) и общего коэффициента дожигания (б) от общего расхода кислорода на дожигание CO при различных содержаниях горючих газов: 1, 2, 3 – содержание CO в начале, середине и конце продувки кислородом; 4, 5, 6 – содержание CO<sub>2</sub> в начале, середине и конце продувки кислородом

Из рис. 3 видно, что в начальный период продувки кислородом содержание CO существенно выше, чем CO<sub>2</sub> в отходящих газах, что говорит об интенсивном протекании реакции окисления углерода:  $C + 1/2O_2 \rightarrow CO$ . В середине и конце продувки кислородом уже содержание CO<sub>2</sub> составляет 93, а CO – 20 %, что свидетельствует о высокой степени дожигаания горючих газов струями кислорода, истекающими из сопел ТКГ и устройств для дожигаания.

### Выводы

Приведенные данные свидетельствуют о возможности проведения режима дожигаания при использовании метода локально распределенного дожигаания горючих газов с применением топливно-кислородных горелок в дуговой печи. В результате дожигаания горючих газов выделяется существенное количество дополнительного тепла, что позволяет интенсифицировать тепловую работу дуговой печи.

Установлено, что увеличение интенсивности продувки ванны кислородом сопровождается изменением не только тепловой нагрузки печи, но и такого важного технологического параметра как тепло, идущее на шлак, от струй дожигаания CO ( $Q_{CO}^{дож}$ , Вт/м<sup>2</sup>). При повышении скорости окисления углерода по мере роста интенсивности продувки наблюдается уменьшение окисленности шлака. Увеличение скорости обезуглероживания сопровождается усилением интенсивности перемешивания ванны, что усиливает передачу тепла от факела к ванне и приход кислорода из атмосферы печи.

### Литература

1. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи. ТНТ, 2014. 320 с.
2. Меркер Э.Э., Степанов В.А., Крахт Л.Н., Кем А.Ю. Разработка методов и алгоритмов системы оценки параметров режимов обезуглероживания и дожигаания горючих газов в дуговой сталеплавильной печи // Вестник ДГТУ. 2017. №2. С. 99–107.
3. Меркер Э.Э. Проблемы дожигаания оксида углерода и утилизации пыли в конвертере. М., 1996. 192 с.
4. Арутюнов В.А., Стомахин А.Я. и др. Дожигаание отходящих газов и донная продувка кислородом в период расплавления в 100-т дуговой печи // Сталь. 1999. №2. С. 27 – 30.
5. Брукс Г., Маккелан Ж., Машамп Д. и др. Оптимизация химической энергии в электродуговых печах // СЕАИСИ Квартерли Журнал. 2012. №4. С. 17–22.
6. Тулуевский Ю.Н., Нечаев Е.А. Информационные проблемы интенсификации сталеплавильных процессов. М., 1978. 192 с.
7. Милошевич Х. Численное моделирование процесса дожигаания монооксида углерода при верхней продувке сталеплавильного конвертера // Теплофизика и аэромеханика. 1999. №2. С. 283–290.
8. Лисиенко В.И., Засухин А.Л. Способ дожигаания и обеспыливания отходящих газов электродуговых сталеплавильных печей. Патент РФ на изобретение №2451092 от 01.09.2010 кл. С21С005/52.
9. Суценко А.В., Безчерев А.С. Математическое моделирование факела дожигаания отходящих газов в полости кислородного конвертера // Донецкий национальный техничний університет. Наукові праці. Металлургия. 2007. №9. С. 53–58.
10. Нейгебауэр Г.О., Дмитриенко В.И. и др. Состав газовой фазы в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи // Сталь. 1987. №5. С. 142–145.

### References

1. Merker E.E., Chermenev E.A. *Ehlektroplavka metallizovannyh okatyshei v dugovoi pechi* [Electrofusion of metallized pellets in an arc furnace]. TNT, 2014. 320 p.

2. Merker E.E., Stepanov V.A., Kraht L.N., Kem A.YU. Razrabotka metodov i algoritmov sistemy ocenki parametrov rezhimov obezугlerozhivaniia i dozhiganiia goryuchih gazov v dugovoi staleplavil'noi pechi [Development of methods and algorithms for a system for estimating the parameters of decarburization and afterburning modes of combustible gases in an arc steel-making furnace]. *Vestnik DGTU* [Bulletin of Donetsk State Technical University], 2017, no. 2, pp. 99–107.

3. Merker E.E. *Problemy dozhiganiia oksida ugleroda i utilizacii pyli v konvertere* [Problems of afterburning of carbon monoxide and dust utilization in the converter]. Moscow, 1996. 192 p.

4. Arutyunov V.A., Stomahin A.Ia. i dr. Dozhiganie othodyashchih gazov i donnaia produvka kislородом v period rasplavleniia v 100-t dugovoi pechi [Afterburning of off-gases and bottom blowing by oxygen during the melting in a 100-ton arc furnace]. *Stal'* [Steel], 1999, no. 2, pp. 27–30.

5. Bruks G., Makkelan Z., Mashamp D. i dr. Optimizaciia himicheskoi ehnergii v ehlektrodugovykh pechah [Optimization of chemical energy in electric arc furnaces]. *SE AISI Kvarterli Zhurnal* [SE AISI Quarterly Magazine], 2012, no. 4, pp. 17–22.

6. Tuluevskii Iu.N., Nechaev E.A. *Informacionnyie problemy intensivizatsii staleplavil'nykh processov* [Information problems of steelmaking processes intensification]. Moscow, 1978. 192 p.

7. Miloshevich H. Chislennoe modelirovanie processa dozhiganiya monooksida ugleroda pri verhnei produvke staleplavil'nogo konvertera [Numerical modeling of the carbon monoxide afterburning process at the upper blowing of the steelmaking converter]. *Teplofizika i aehromekhanika* [Thermophysics and Aeromechanics], 1999, no. 2, pp. 283–290.

8. Lisienko V.I., Zasuhin A.L. *Sposob dozhiganiia i obespylivaniia othodyashchih gazov ehlektrodugovykh staleplavil'nykh pechei. Patent RF na izobretenie №2451092 ot 01.09.2010 kl. S21S005/52* [Method of afterburning and dedusting of waste gases from electric arc steel furnaces. The patent of the Russian Federation for the invention № 2451092 from 01.09.2010 cl. C21C005/52].

9. Sushchenko A.V., Bezcherev A.S. Matematicheskoe modelirovanie fakela dozhiganiia othodyashchih gazov v polosti kislородnogo konvertera [Mathematical modeling of the flare afterburning of waste gases in the cavity of the oxygen converter]. *Doneckii nacional'nyj tekhnichnii universitet. Naukovi praci. "Metallurgiya"* [Donetsk national technical university. Metallurgy], 2007, no. 9, pp. 53–58.

10. Neigebauehr G.O., Dmitrienko V.I. i dr. Sostav gazovoi fazy v rabochem prostranstve dugovoi staleplavil'noi pechi [Composition of the gas phase in the working space of an arc steel-making furnace]. *Stal'* [Steel], 1987, no. 5, pp. 142–145.

---

Для цитирования: Степанов В.А., Крахт Л.Н., Меркер Э.Э., Ершов Е.В., Королькова Л.Н. Исследование и разработка метода локально распределенного дожигания горючих газов в дуговой печи // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №2(83). С. 54–62. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-7

For citation: Stepanov V.A., Krakht L.N., Merker E.E., Ershov E.V., Korolkova L.N. The research and development of a method of locally distributed afterburning of combustible gases in the arc furnace. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 2 (83), pp. 54–62. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-7