

## Определение влияния теплофизических параметров на интенсификацию процессов теплообмена в ванне сталеплавильного агрегата

**А. А. Петрик, И. Г. Яковлева**

Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, Запорожье, 69006, Украина

*К числу важнейших проблем разработки энергосберегающих технологий сталеплавильного производства стали относится проблема продувки ванны сталеплавильного агрегата с организацией эффективного кислородного режима выплавки стали для дожигания оксида углерода в отходящих газах с целью улучшения теплового баланса плавки. В условиях дефицита и высокой стоимости энергоносителей такая технология позволяет снизить затраты на выплавку стали. С целью анализа и интенсификации тепловых и кислородных режимов ведения плавки и определения влияния интенсивности продувки на теплофизические и газодинамические процессы в ванне выполнены исследование теплообмена в объеме сталеплавильного агрегата при барботировании расплава. Приведены результаты исследований, направленных на изучение влияния теплофизических параметров подаваемого газа на интенсификацию процессов теплообмена при барботировании расплава в ванне сталеплавильного агрегата. Определено влияние на процесс теплообмена угла наклона сопел дутьевого устройства и положения фурм над расплавом. Найдена зависимость величины теплового потока при взаимодействии струи кислорода с поверхностью шлакового расплава от расхода кислорода и коэффициента теплоотдачи. Установлено, что при увеличении угла наклона сопел значения коэффициента теплоотдачи и теплового потока снижаются. Это связано с увеличением длины струи, снижением глубины лунки. Это приводит к снижению интенсивности перемешивания ванны и меньшей передаче тепла к шлаку и к металлу. При приближении дутьевого устройства к расплаву отмечается увеличение коэффициента теплоотдачи и теплового потока. Это связано с увеличением перемешивания ванны.*

**Ключевые слова:** Тепловой поток; Теплообмен; Кислородный режим; Теплофизические параметры; Интенсификация; Коэффициент теплоотдачи.

## Визначення впливу теплофізичних параметрів на інтенсифікацію процесів теплообміну у ванні сталеплавильних агрегатів

**О. А. Петрик, І. Г. Яковлева**

Запорізька державна інженерна академія, Пр. Соборний 226, Запоріжжя, 69006, Україна

*До числа найважливіших проблем розробки енергозберігаючих технологій виробництва сталі відноситься проблема продувки ванни сталеплавильного агрегату з організацією ефективного кисневого режиму виплавки для допалювання оксиду вуглецю у відхідних газах з метою поліпшення теплового балансу плавки. В умовах дефіциту і високої вартості енергоносіїв така технологія дозволяє знизити витрати на виплавку сталі. З метою аналізу та інтенсифікації теплових і кисневих режимів ведення плавки і визначення впливу інтенсивності продувки на теплофізичні і газодинамічні процеси в ванні виконані дослідження теплообміну в об'ємі сталеплавильного агрегату при кипінні розплаву. Приведено результати досліджень, спрямованих на вивчення впливу теплофізичних параметрів газу, що подається на інтенсифікацію процесів теплообміну при кипінні розплаву у ванні сталеплавильного агрегату. Визначено вплив на процес теплообміну кутів нахилу сопел дутьевого пристрою та положення фурм над розплавом. Знайдена залежність величини теплового потоку при взаємодії струменя кисню з поверхнею шлакового розплаву від витрати кисню і коефіцієнта тепловіддачі. Встановлено, що при збільшенні кута нахилу сопел значення коефіцієнта тепловіддачі і теплового потоку знижуються. Це пов'язано зі збільшенням довжини струменя, зниженням глибини лунки, що призводить до зниження інтенсивності перемішування ванни і меншої передачі тепла до шлаку і до металу. При наближенні дутьевого пристрою до розплаву відзначається збільшення коефіцієнта тепловіддачі і теплового потоку. Це пов'язано зі збільшенням перемішування ванни.*

**Ключові слова:** Тепловий потік; Теплообмін; Кисневий режим; Теплофізичні параметри; Інтенсифікація; Коефіцієнт тепловіддачі.

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i1.543>

© The Author(s) 2017. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1 Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

К числу важнейших проблем разработки энергосберегающих технологий сталеплавильного производства стали относится проблема продувки ванны сталеплавильного агрегата с организацией эффективного кислородного режима выплавки стали для дожигания оксида углерода в отходящих газах с целью улучшения теплового баланса плавки. В условиях дефицита и высокой стоимости энергоносителей такая технология позволяет снизить затраты на выплавку стали.

## 2 Анализ исследований и публикаций

В соответствии с [1, 2] эффективность теплообмена между струями дожигания и шлаком, куда внедряются эти струи, обуславливается соотношением скоростей процессов тепловыделения и теплоотвода из зоны реакции. В работе [3] приведены данные, свидетельствующие о влиянии числа Рейнольдса и длины струй дожигания на коэффициент теплоотдачи при использовании двухъярусной фурмы для условий 250-т конвертера. Согласно [4] производится расчет плотности тепловых потоков в общем виде, без учета особенностей конструкции дутьевого устройства.

## 3 Постановка задачи

С целью анализа и интенсификации тепловых и кислородных режимов ведения плавки и определения влияния интенсивности продувки на теплофизические и газодинамические процессы в ванне выполним исследование теплообмена в объеме сталеплавильного агрегата при барботировании расплава. Также определим влияние на процесс теплообмена углов наклона сопел ( $\alpha_{\text{сопел}}$ ) дутьевого устройства и положения фурм над расплавом ( $H_{\phi}$ ).

## 4 Изложение материалов и результаты

Согласно [5] для анализа плотности тепловых потоков ( $q$ , Вт/м<sup>2</sup>), поступающих от кислородных струй при взаимодействии кислорода с шлакогазометаллическим объемом, в т.ч. за счет дожигания монооксида углерода (CO) до диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), к поверхности шлакового расплава, омывающего эти струи, использовали зависимость:

$$q_{CO} = Q_{CO} / S, \quad (1)$$

где  $Q_{CO} = Q_{\text{юнев}}$ , Вт, т.е. количество теплоты, передаваемое конвекцией

$$Q_{\text{юнев}} = \alpha_{\text{ж}} * \Delta T * S, \text{ кВт} \quad (2)$$

$\Delta T$  – разность между температурой струи кислорода и шлаком, °С;  $\alpha_{\text{ж}}$  – коэффициент теплоотдачи в системе струя кислорода – шлак при дожигании CO до CO<sub>2</sub>, Вт/(м<sup>2</sup>\*°С);  $S$  – поверхность теплообмена, м<sup>2</sup>.

При этом количество тепла, выделяемое при дожигании CO до CO<sub>2</sub> равно:

$$Q_{CO} = V_{CO} * \rho^{CO} * 10.15 * 10^6, \text{ Вт},$$

где  $V_{CO}$  – объемный расход CO при взаимодействии расплава с кислородом, м<sup>3</sup>/с;  $\rho^{CO}$  – средняя плотность CO, при температуре газов в струе, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho^{CO} = \rho_0^{CO} * (T_0 * \frac{p}{T * p_0}). \quad (3)$$

Другим определяющим фактором является скорость омывания среды вокруг корпуса фурмы ( $\overline{W}_D^+$ , м/с) газовыми потоками тепловоспринимающей поверхности шлака в барботируемом расплаве при продувке сталеплавильного агрегата. Эта скорость [6] определяется дутьевыми параметрами и ее можно представить как приведенную скорость потоков в среде газ-шлак-металл (м/с) на горизонтальное поперечное сечение ( $S_B$ , м<sup>2</sup>) ванны, т.е. ( $I_{O_2} / S_B$ ), (м/с), где  $I_{O_2}$  – объемный расход кислорода, м<sup>3</sup>/с.

Интерес представляет рассмотрение этого соотношения в теплообменных процессах в шлаковом расплаве связана как с тенденцией их интенсификации и ускорения процессов шлакообразования при взаимодействии струи кислорода с CO и дальнейшем его дожигании до CO<sub>2</sub>, так и с увеличением значения этого соотношения за счет увеличения объемного расхода кислорода с целью интенсификации процесса выплавки стали и повышения производительности агрегата [3,7].

На рисунках 1, 2 приведены данные зависимости плотности потоков от разных значений интенсивности продувки и коэффициента теплоотдачи при различных значениях углов наклона сопел к расплаву.

При определении коэффициента теплоотдачи для системы шлак-газовые струи использовали [5, 6] критерияльную зависимость вида:

$$Nu = 0.0435 * Re^{0.8} * Pr^{0.33}, \quad (4)$$

где

$$Nu = \overline{q}_{\text{ж}} * L_c / \lambda_{\text{с}} \quad (5)$$

$$Re = \overline{W}_D^+ * L_c / \nu_{\text{т}}, \quad (6)$$

$$Pr = \nu_{\text{т}} / \alpha_{\text{т}}, \quad (7)$$

$Nu$ ,  $Re$ ,  $Pr$  – критерии (числа) Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля;  $\lambda_{\text{с}}$  – коэффициент теплопроводности смеси кислород-металл-шлак, Вт/(м\*К);  $\nu_{\text{т}}$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $L_c$  – длина струи в шлаке (определяющий геометрический параметр), м;

$$\alpha_{\text{т}} = \lambda_{\text{т}} / (\bar{c} * \rho), \quad (8)$$

где  $\alpha_{\text{т}}$  – температуропроводность расплава, м<sup>2</sup>/с;  $\bar{c}$  – теплоемкость расплава, Дж/(кг\*К);  $\rho$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>.

Определим скорость омывания в соответствии с [7]:

$$\overline{W}_D^+ = \left( \frac{I_{O_2}}{S_B} \right) / \left( \frac{\Delta H}{H_0} \right), \quad (9)$$

где  $\Delta H$  – характер изменения уровня ванны, при воздействии на нее струй кислорода, м;  $H_0$  – начальная высота металла в ванне, м;

В соответствии с [8, 9] значение  $\frac{\Delta H}{H_0}$  определяется по формуле:

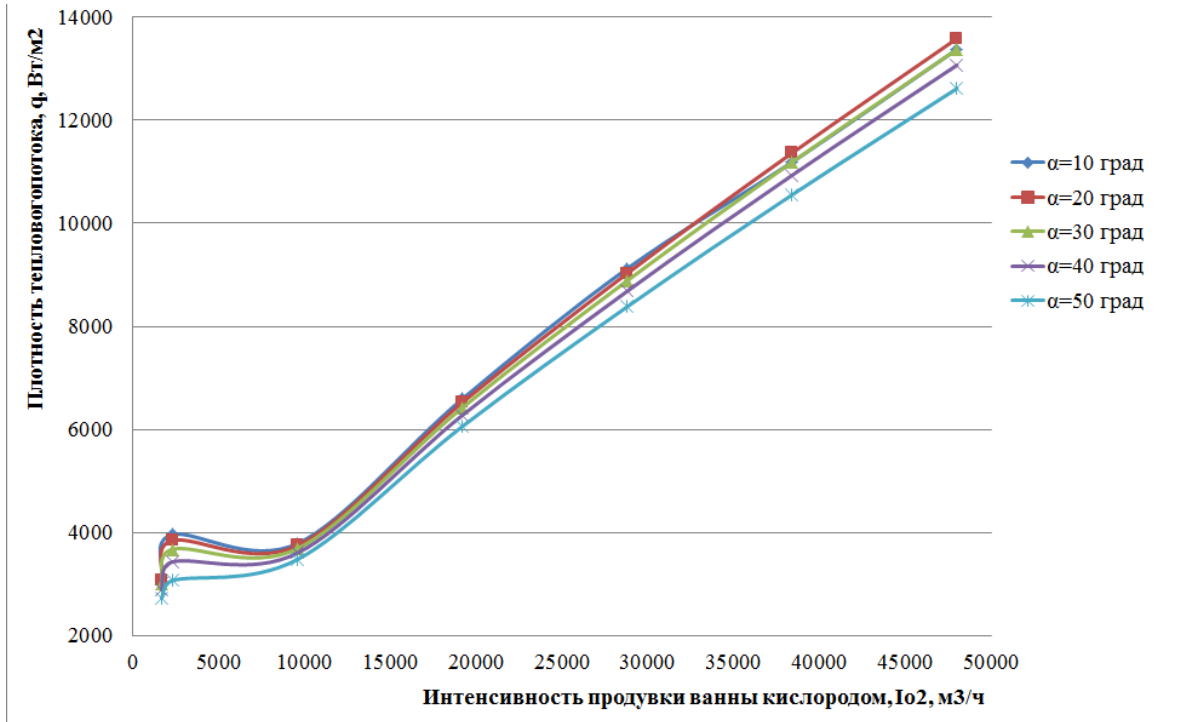
$$\frac{\Delta H}{H_0} = 0.408 * Fr^{0.459}, \quad (10)$$

где  $Fr$  – число Фруда,

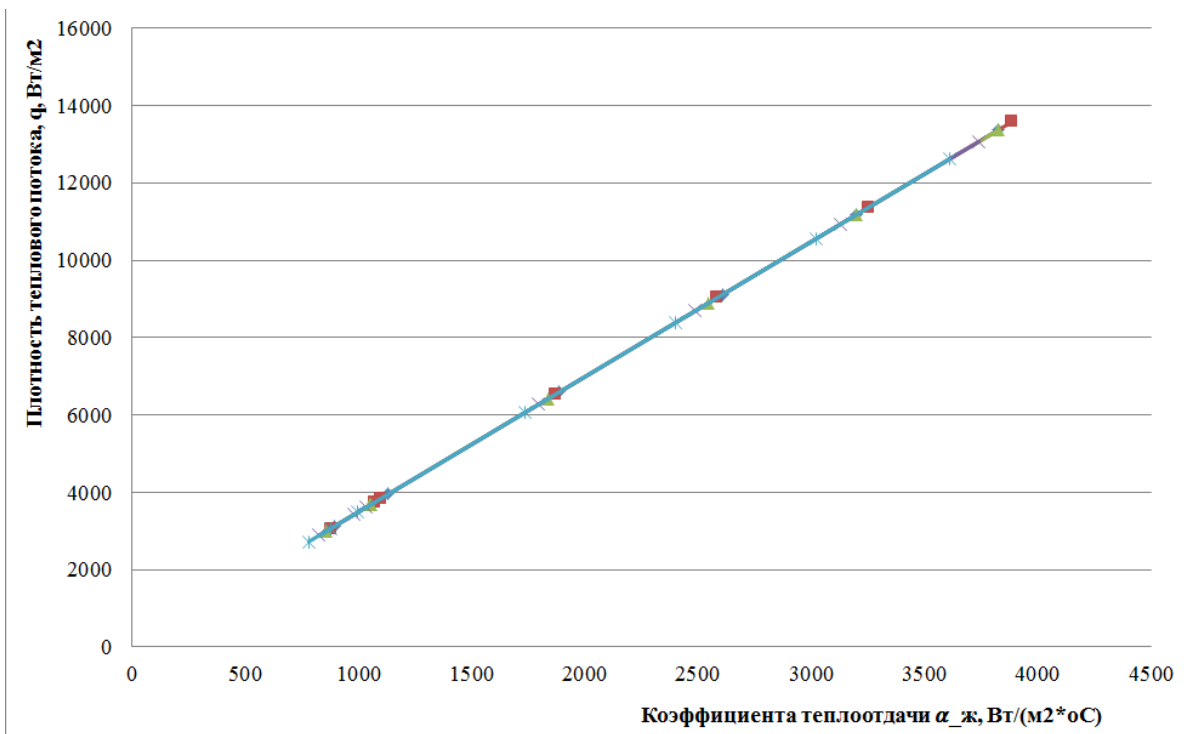
$$Fr = \frac{\overline{V}_{CO}^2}{g} * H_D, \quad (11)$$

где  $\overline{V}_{CO}$  – средняя скорость выделения CO из расплава при продувке, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения, 9,832 м/с<sup>2</sup>.



**Рисунок 1** – Зависимость величины теплового потока при взаимодействии струи кислорода с поверхностью шлакового расплава в зависимости от расхода кислорода при различных значениях углов наклона сопел к расплаву.



**Рисунок 2** – Зависимость величины теплового потока при взаимодействии струи кислорода с поверхностью шлакового расплава в зависимости от коэффициента теплоотдачи.

Подставив (10), (11) в (9) получим

$$\begin{aligned} \overline{W}_D^+ &= \frac{I_{O_2}}{S_B * 0,408 * Fr^{0,459}} = \\ &= \frac{I_{O_2} * g^{0,459}}{S_B * 0,408 * (U_{CO}^2)^{0,459} * H_D^{0,459}} = \\ &= \frac{6,9978 * I_{O_2}}{S_B * (U_{CO}^2)^{0,459} * H_D^{0,459}}, \end{aligned} \quad (12)$$

При этом следует отметить, что физически струя кислорода (выраженная через теплотехнический параметр – интенсивность продувки) используется для дожигания CO до CO<sub>2</sub>.

В таблице 1 приведены результаты расчетов по уравнению (1) для широкого диапазона газодинамических и теплофизических параметров.

Из анализа данных таблицы 1 следует, что теплотехнические параметры (тепловой поток и коэффициент теплоотдачи) возрастают при повышении интенсивность продувки. Этот факт объясняется тем, что струи кислорода, проходя среду газ-металл-шлак после передачи тепла шлаку и металлу, распространяются в остальные объемы шлака, вызывая его энергичное перемешивание.

Данный вывод вытекает также из анализа приведенных выше выражений. Так, например, при увели-

чении соотношения  $(\frac{I_{O_2}}{S_B})$  возрастают значения скорости, чисел Рейнольдса и Нуссельта, что приводит к повышению значений теплового потока и коэффициента теплоотдачи.

Обработка полученных результатов позволила получить следующие расчетные формулы для оценки эффективности теплообмена в условиях продувки ванны сталеплавильного агрегата кислородом (на примере 250-т сталеплавильного агрегата и 160-т конвертера).

$$Q_{CO} = 5,0846 * I_{O_2} + 54938,0, R=0,99 \quad (13)$$

$$Q_{CO} = 65571,77 + 5,1175 * I_{O_2} - 363,81 * \alpha_{опел}, R=0,98 \quad (14)$$

$$Q_{CO} = 59221,73 - 0,11967 * R_{\theta} + 1223523 * \frac{I_{O_2}}{S_B}, R=0,98 \quad (15)$$

$$Q_{CO} = 10,7729 + 79,997 * \alpha_{жк}, R=0,99 \quad (16)$$

Из анализа приведенных зависимостей (13-16) и данных таблицы 1 следует вывод о том, что эффективность теплообмена в системе газ-металл-шлак возрастает при повышении интенсивности продувки, а также при увеличении значений углов наклона сопел.

По результатам расчетов построены графические зависимости (рисунки 3-6) при разных углах наклона сопел в интервале от 10° до 50°.

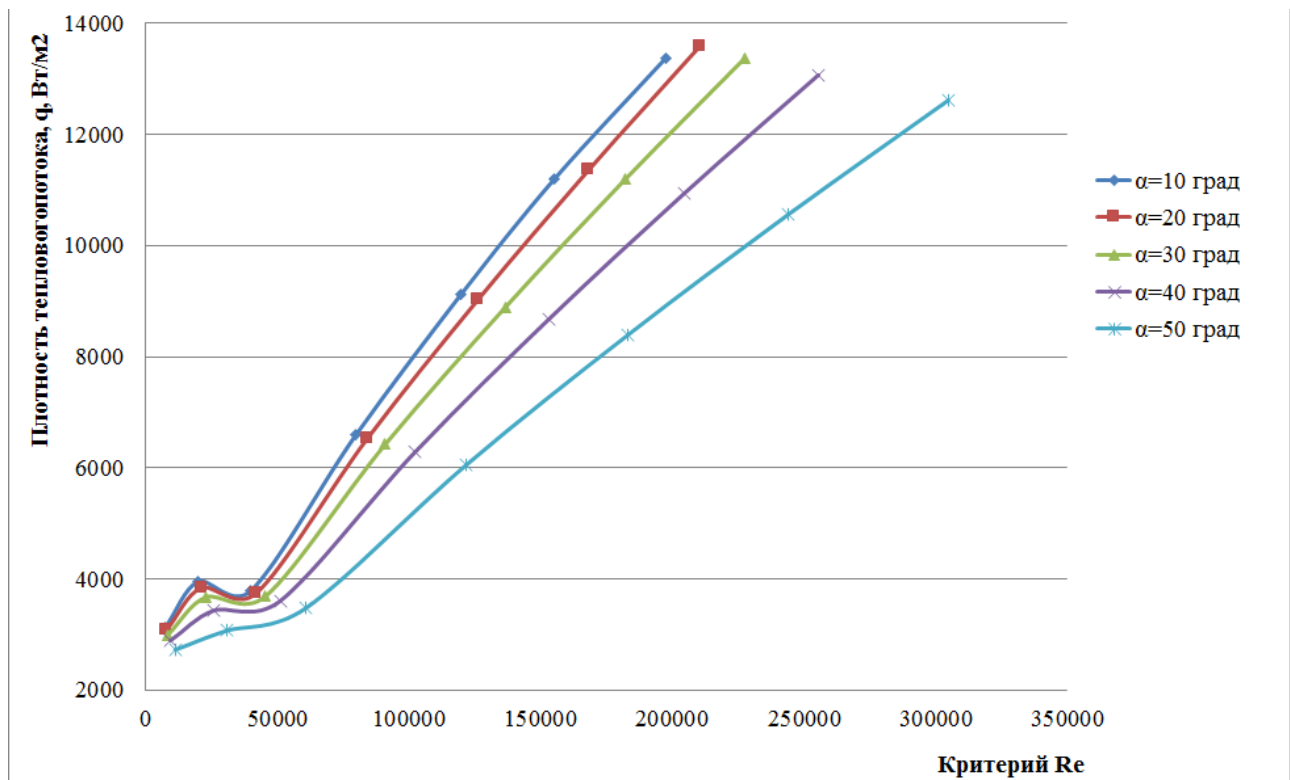
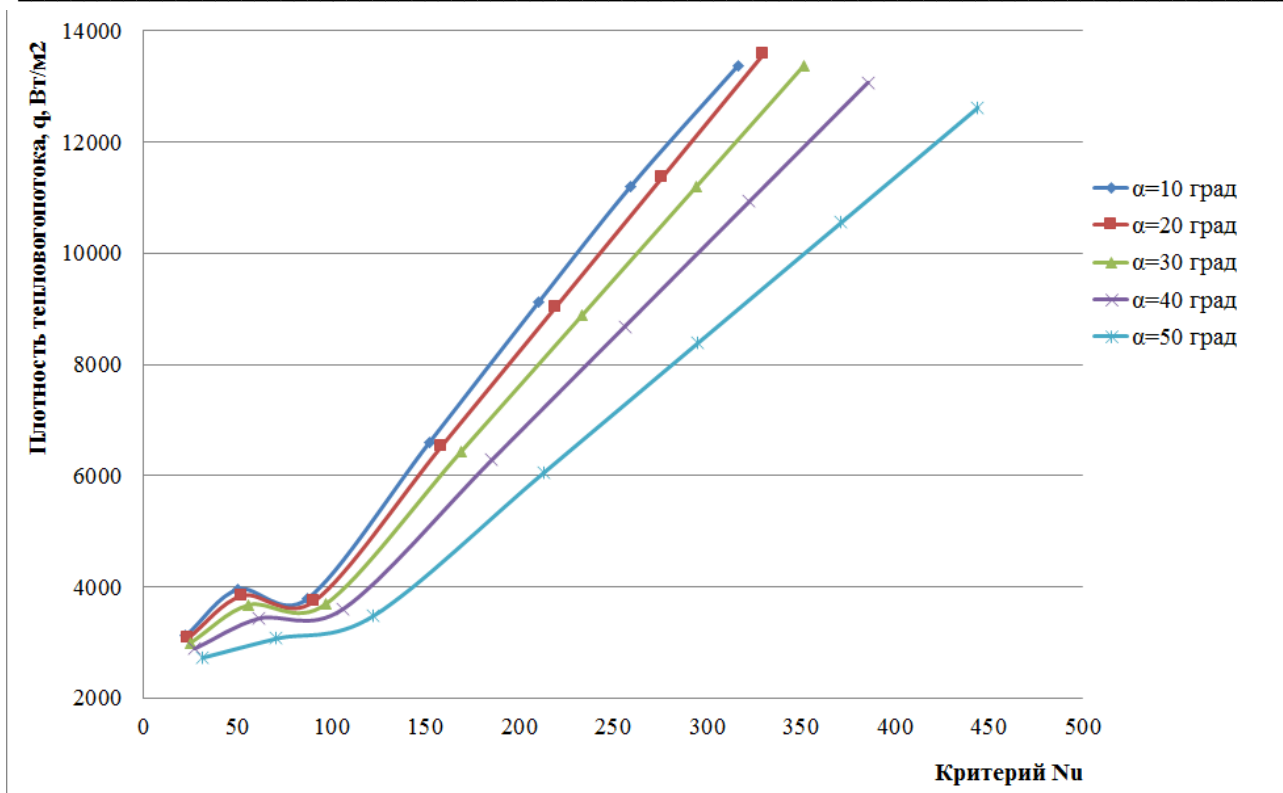
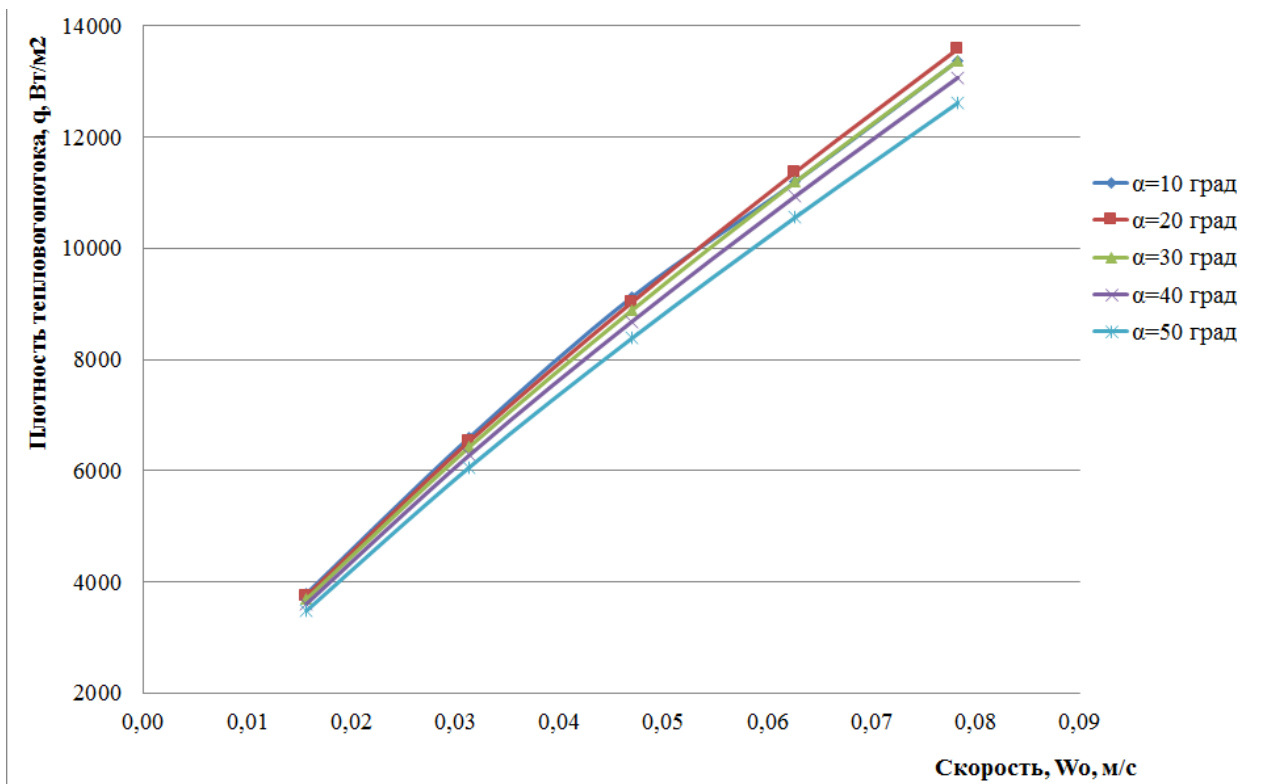


Рисунок 3 – Зависимость величины теплового потока от критерия Рейнольдса при разных углах наклона сопел.



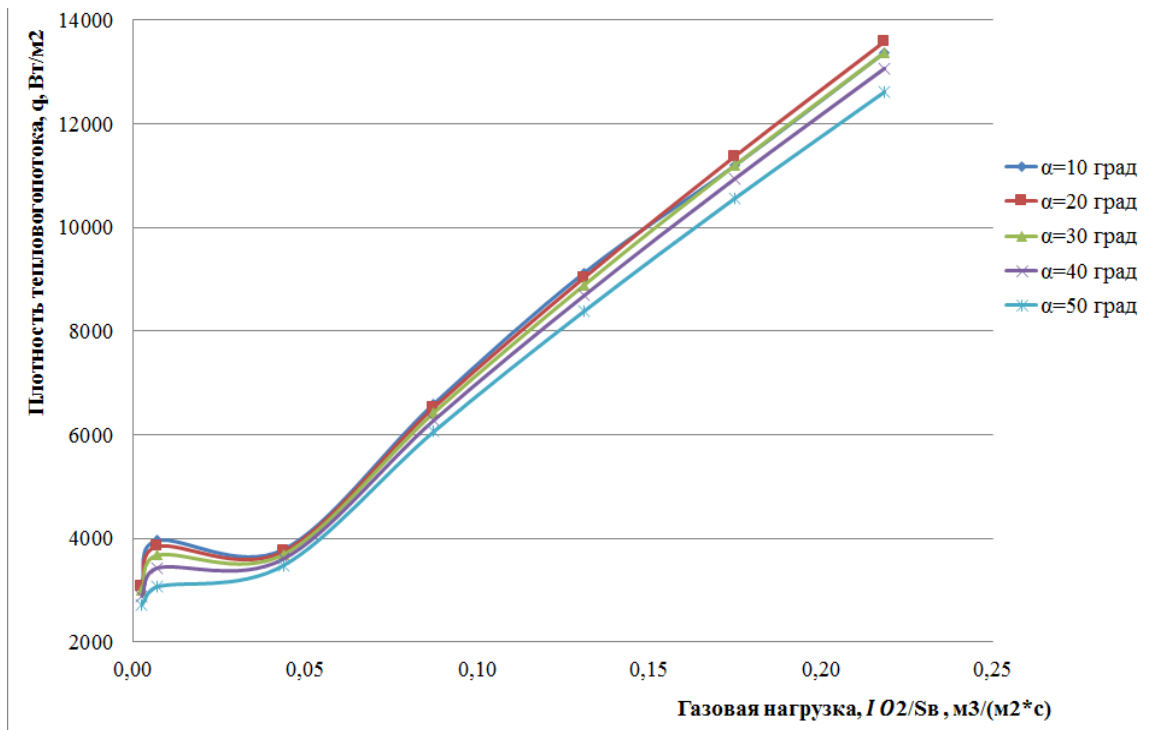
**Рисунок 4** – Зависимость величины теплового потока от критерия Нуссельта при разных углах наклона сопел.



**Рисунок 5** – Зависимость величины теплового потока от скорости омывания среды вокруг корпуса фурмы газовыми потоками тепловоспринимающей поверхности шлака в барботируемом расплаве при разных углах наклона сопел.

Таблица 1 – Результаты расчета газодинамических и теплофизических характеристик при взаимодействии струй кислорода со шлаком в сталеплавильном агрегате

$I_{O_2}$ , м <sup>3</sup> /ч	$I_{O_2}$ , м <sup>3</sup> / т*мин	Vс, %[С] /мин	Но, м	Нф, м	α, град	Лс, м	Re	Pr	Nu	W <sub>0</sub>	Uр, м/с	α <sub>жс</sub> Вт/(м <sup>2</sup> *оС)	Tс, °С	Tшл, °С	Qсо, Вт	Qсо, Вт/м <sup>2</sup>
1670	0,06	0,09	1,65	0,3	10	0,306	7304	0,138	22,44	0,0143	0,0026	892,72	1700	1620	71417,32	3119,94
	0,06	0,09	1,65	0,3	20	0,323	7697	0,138	23,40	0,0143	0,0026	878,21	1700	1620	70256,47	3069,23
	0,06	0,09	1,65	0,3	30	0,349	8323	0,138	24,91	0,0143	0,0026	856,80	1700	1620	68544,34	2994,43
	0,06	0,09	1,65	0,3	40	0,392	9345	0,138	27,33	0,0143	0,0026	825,75	1700	1620	66180,39	2891,16
	0,06	0,09	1,65	0,3	50	0,467	11149	0,138	31,47	0,0143	0,0026	779,75	1700	1620	62379,85	2725,13
2300	0,16	0,10	1,65	0,3	10	0,306	20119	0,138	50,47	0,0394	0,0070	1132,53	1700	1620	90602,72	3958,08
	0,16	0,10	1,65	0,3	20	0,323	21200	0,138	52,63	0,0394	0,0070	1099,90	1700	1620	87991,71	3844,01
	0,16	0,10	1,65	0,3	30	0,349	22926	0,138	56,03	0,0394	0,0070	1051,76	1700	1620	84140,74	3675,78
	0,16	0,10	1,65	0,3	40	0,392	25739	0,138	61,47	0,0394	0,0070	981,92	1700	1620	78553,79	3431,71
	0,16	0,10	1,65	0,3	50	0,467	30711	0,138	70,79	0,0394	0,0070	878,44	1700	1620	70275,41	3070,06
9600	1,00	0,13	1,65	1,5	10	1,531	39923	0,138	87,32	0,0156	0,0437	1083,99	1700	1620	86719,28	3788,42
	1,00	0,13	1,65	1,5	20	1,613	42070	0,138	91,06	0,0156	0,0437	1072,70	1700	1620	85815,75	3748,95
	1,00	0,13	1,65	1,5	30	1,744	45494	0,138	96,94	0,0156	0,0437	1056,04	1700	1620	84483,15	3690,74
	1,00	0,13	1,65	1,5	40	1,958	51077	0,138	106,35	0,0156	0,0437	1031,87	1700	1620	82549,83	3606,28
	1,00	0,13	1,65	1,5	50	2,336	60942	0,138	122,49	0,0156	0,0437	996,06	1700	1620	79685,16	3481,13
19200	2,00	0,16	1,65	1,5	10	1,531	79847	0,138	152,04	0,0313	0,0874	1887,34	1700	1620	150987,03	6596,03
	2,00	0,16	1,65	1,5	20	1,613	84139	0,138	158,55	0,0313	0,0874	1867,67	1700	1620	149413,91	6527,30
	2,00	0,16	1,65	1,5	30	1,744	90988	0,138	168,79	0,0313	0,0874	1838,67	1700	1620	147093,72	6425,94
	2,00	0,16	1,65	1,5	40	1,958	102153	0,138	185,17	0,0313	0,0874	1796,60	1700	1620	143727,60	6278,89
	2,00	0,16	1,65	1,5	50	2,336	121884	0,138	213,26	0,0313	0,0874	1734,25	1700	1620	138739,92	6061,00
28800	3,00	0,20	1,65	1,5	10	1,531	119770	0,138	210,30	0,0469	0,1311	2610,49	1700	1620	208839,50	9123,37
	3,00	0,20	1,65	1,5	20	1,613	126209	0,138	219,30	0,0469	0,1311	2583,30	1700	1620	206713,62	9030,50
	3,00	0,20	1,65	1,5	30	1,744	136482	0,138	233,46	0,0469	0,1311	2543,18	1700	1620	203454,42	8888,12
	3,00	0,20	1,65	1,5	40	1,958	153230	0,138	256,11	0,0469	0,1311	2484,98	1700	1620	198798,54	8684,72
	3,00	0,20	1,65	1,5	50	2,336	182826	0,138	294,98	0,0469	0,1311	2398,75	1700	1620	191899,76	8383,34
38400	4,00	0,24	1,65	1,5	30	1,744	181976	0,138	293,88	0,0626	0,1747	3201,31	1700	1620	256105,03	11188,22
	4,00	0,24	1,65	1,5	20	1,613	168279	0,138	276,04	0,0626	0,1747	3251,81	1700	1620	260144,72	11364,70
	4,00	0,24	1,65	1,5	30	1,744	181976	0,138	293,88	0,0626	0,1747	3201,31	1700	1620	256105,03	11188,22
	4,00	0,24	1,65	1,5	40	1,958	204307	0,138	322,39	0,0626	0,1747	3128,05	1700	1620	250244,29	10932,19
	4,00	0,24	1,65	1,5	50	2,336	243768	0,138	371,31	0,0626	0,1747	3019,50	1700	1620	241560,23	10552,81
48000	5,00	0,28	1,65	1,5	30	1,744	227470	0,138	351,31	0,0782	0,2184	3826,98	1700	1620	306158,36	13374,85
	5,00	0,28	1,65	1,5	20	1,613	210348	0,138	330,00	0,0782	0,2184	3887,34	1700	1620	310987,57	13585,82
	5,00	0,28	1,65	1,5	30	1,744	227470	0,138	351,31	0,0782	0,2184	3826,98	1700	1620	306158,36	13374,85
	5,00	0,28	1,65	1,5	40	1,958	255384	0,138	385,40	0,0782	0,2184	3739,40	1700	1620	299152,19	13068,78
	5,00	0,28	1,65	1,5	50	2,336	304710	0,138	443,88	0,0782	0,2184	3609,64	1700	1620	288770,91	12615,26



**Рисунок 6** – Зависимость величины теплового потока от газовой дутьевой нагрузки при разных углах наклона сопел

Из анализа таблицы 1 видно, что с увеличением угла наклона сопел от 10 до 50° значения коэффициента теплоотдачи и теплового потока снижаются, что связано с увеличением длины (траектории) струи кислорода. При этом из уравнения (5) видно, что длина струи обратно пропорциональна коэффициенту теплоотдачи. В свою очередь, с уменьшением высоты фурмы (дутьевое устройство ближе к расплаву) отмечается увеличение коэффициента теплоотдачи и теплового потока, что связано с увеличением перемешивания ванны.

Положительный эффект по интенсификации режима теплообмена при возрастании соотношения  $\left(\frac{l_{O_2}}{S_{\text{в}}}\right)$  в зоне продувки обусловлен увеличением поверхности контакта в ванне между пузырями CO и кислородными струями. По мере увеличения скорости движения струй и повышения их температуры при дожигании CO возрастает уровень конвективной теплоотдачи в системе струи кислорода - шлак в целом.

### Выводы и направления дальнейших исследований

1. Выполнен анализ факторов, влияющих на интенсификации тепловых и кислородных режимов ведения плавки, и определено влияние интенсивности продувки на теплофизические и газодинамические процессы в ванне.

2. При исследовании теплообмена в объеме сталеплавильного агрегата при барботировании шлакогазового объема установлена зависимость величины

теплового потока при взаимодействии струи кислорода с поверхностью шлакового расплава от расхода кислорода и коэффициента теплоотдачи, из которых видно, что значения теплотехнических параметров (коэффициента теплоотдачи и теплового потока) возрастают при повышении расхода кислорода на ванну. Этот факт объясняется тем, что струи кислорода, проходя среду газ-металл-шлак после передачи тепла шлаку и металлу, распространяются в остальные объемы шлака, вызывая его энергичное перемешивание.

3. Проведенный анализ полученных результатов установил, что при увеличении угла наклона сопел значения коэффициента теплоотдачи и теплового потока снижаются, что связано с увеличением длины струи и, следовательно, снижением глубины лунки, что приводит к снижению интенсивности перемешивания ванны и меньшей передаче тепла шлаку и металлу. В свою очередь, с уменьшением высоты фурмы (дутьевое устройство ближе к расплаву) отмечается увеличение коэффициента теплоотдачи и теплового потока, что связано с увеличением перемешивания ванны.

4. Математическая обработка расчетных данных позволила получить ряд уравнений регрессии для оценки эффективности теплообмена в условиях продувки ванны сталеплавильного агрегата кислородом (на примере 250-т сталеплавильного агрегата и 160-т конвертера). При этом значение коэффициента корреляции ( $R=0.98-0.99$ ) указывает на «весьма высокую» прямую связь и точность расчетов. Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что эффективность теплообмена в системе газ-металл-шлак возрас-

тает при повышении параметров интенсивности продувки, а также при снижении значений углов наклона сопел.

5. Результаты исследований позволят сформулировать рекомендации для разработки рациональных конструкций дутьевых устройств.

## Литература

1. Меркер Э.Э. Организация газодинамической защиты над зоной продувки в конвертере с учётом влияния шлака [Текст] / Э.Э. Меркер, Г.А. Карпенко // Изв. ВУЗов «Чёрная металлургия». - 2001. - №3. - С. 18-22.
2. Бойченко Б.М. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология [Текст] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. - Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. - 454 с.
3. Кожухов А.А. Исследования эффективности продувки конвертерной ванны двухъярусным потоком кислорода методом математического моделирования [Текст] / А.А. Кожухов, Э.Э. Меркер // Известия вузов «Черная металлургия». - 2001. - №1. - С. 20-22.
4. Мазо А.Б. Основы теории и методы расчета теплопередачи: учебное пособие [Текст] / А.Б. Мазо. - Казань: Казан. ун-т, 2013. - 144 с.
5. Дюдкин Д. А. Современная технология производства стали [Текст] / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. - М.: Теплотехник, 2007. - 528 с.
6. Кобеза И.И. Совершенствование систем охлаждения продувочных кислородных фурм [Текст] / И.И. Кобеза, И.Д. Усачева, В.И. Беличенко // Технология производства мартеновской и мартеновской стали массового назначения. - М.: Металлургия, 1981. - с.70-76.
7. Меркер Э.Э. Исследование теплофизических процессов при дожигании оксида углерода в конвертере [Текст] / Э.Э. Меркер, Г.А. Карпенко // Международный журнал экспериментального образования. - 2010. - №2. - С. 52-55.
8. Бигеев А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали [Текст]: учебник для вузов / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев // 3-е изд., перераб. и доп. - Магнитогорск: МГТУ, 2000. - 544 с.
9. Меркер Э. Э. Физические и тепловые процессы при выплавке и внепечной обработке стали: [монография] / Э. Э. Меркер, В. П. Лузгин, Г. А. Карпенко. - Старый Оскол: ТНТ, 2015. - 290 с.

Отримана в редакції 28.10.2016, прийнята до друку 07.02.2017

## Determination of the Thermophysical Parameters Influence on the Heat Exchange Processes Intensification in the Steel-Fuel Unit Bath

**A. A. Petrik, I. G. Yakovleva**

Zaporizhzhya State Engineering Academy, 226 av. Soborniy, Zaporozhye, 69006, Ukraine  
e-mail: iternel17@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-5824-6287

One of the most important problem in the development of power-saving steelmaking technologies is the problem of blowing a bath of a steelmaking unit with the organization of an efficient oxygen modes of reburning CO oxygen in steel-smelting furnaces with the purpose of smelting heat balance improvement. In conditions of shortage and high cost of power sources, this technology allows to bring the expense of steel smelting process. In order to analyze and intensify the thermal and oxygen modes of melting and determine the influence of the purge intensity on the thermophysical and gas-dynamic processes in the bath, the heat exchange in the volume of the steelmaking unit during bubbling of the melt was performed. The results of studies aimed to the study of the effect of thermophysical parameters of the feeding gas on the intensification of heat transfer processes during bubbling of the melt in the bath of the steelmaking unit are given. The influence of the blower nozzles inclination angles and the position of the tuyeres over the melt on the heat transfer process was determined. The dependence of the heat flux value during the interaction of the oxygen jet with the surface of the slag melt on the oxygen consumption and the heat transfer coefficient was found. It is established that with the increase of the nozzles inclination angle, the values of the heat transfer coefficient and the heat flux reduce. This is due to the increase in the length of the jet, the decrease in the depth of the hole. This leads to a decrease in the intensity of bath mixing and less heat transfer to the slag and to the metal. When the blowing device approaches to the melt, an increase in the heat transfer coefficient and heat flux is noted. It is connected with the intensification of the bath mixing.

**Key words:** Heat flow; Heat exchange; Oxygen mode; Thermophysical parameters; Intensification; Heat Transfer Coefficient.

## References

1. **Merker, E.E., Karpenko, G.A.** (2001) Organizatsiya gazo-dinamicheskoy zashchity nad zonoy produvki v konvertore s uchotom vliyaniya shlaka [Organization of gas-dynamic protection over the purge zone in the converter taking into account the effect of slag]. *Izvestiya vuzov «Chernaya metallurgiya»*, №3, 18-22 (in Russian).
2. **Boychenko, B.M., Okhotskiy, V.B., Kharlashin, P.S.** (2006). Konverternoye proizvodstvo stali teoriya, tekhnologiya, kachestvo stali, konstruksii agregatov, retsirkulyatsiya materialov i ekologiya [The converter steel production theory, technology, steel quality, aggregate designs, materials recycling and ecology]. Dnepropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 454 (in Russian).
3. **Kozhukhov, A.A., Merker, E.E.** (2001) Issledovaniya effektivnosti produvki konverternoy vannы dvukh"yarusnym potokom kisloroda metodom matematicheskogo modelirovaniya [Investigations of the efficiency of blowing a converter bath by a two-tier oxygen flow by the method of mathematical modeling]. *Izvestiya vuzov «Chernaya metallurgiya»*, №1, 20-22 (in Russian).
4. **Mazo, A.B.** (2013) Osnovy teorii i metody rascheta teploperedachi: uchebnoye posobiye [Fundamentals of the theory and methods for calculating heat transfer] Kazan: Kazan. un-t, 144 (in Russian).
5. **Dyudkin, D. A., Kisilenko, V.V.** (2007) Sovremennaya tekhnologiya proizvodstva stali [Modern technology of steel production]. M.: Teplotekhnik, 528 (in Russian).
6. **Kobeza, I.I., Usacheva, I.D., Belichenko, V.I.** (1981) Sovershenstvovaniye sistem okhlazhdeniya produvochnykh kislorodnykh furn [Perfection of cooling systems for purge oxygen tuyeres]. *Tekhnologiya proizvodstva martenovskoy i martenovskoy stali massovogo naznacheniya*. M.: Metallurgiya, 70-76 (in Russian).
7. **Merker, E.E., Karpenko, G.A.** (2010) Issledovaniye teplofizicheskikh protsessov pri dozhiganií oksida ugleroda v konvertere [Investigation of thermophysical processes in the afterburning of carbon monoxide in the converter]. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*, №2, 52-55 (in Russian).
8. **Bigeyev, A.M., Bigeyev, V.A.** (2000) Metallurgiya stali. Teoriya i tekhnologiya plavki stali [Metallurgy of steel. Theory and technology of steel melting]. Magnitogorsk: MG TU, 544 (in Russian).
9. **Merker, E. E., Luzgin, V. P., Karpenko, G.A.** (2015) Fizicheskiye i teplovyye protsessy pri vyplavke i vnepechnoy obrabotke stali. Staryy Oskol [Physical and thermal processes in the smelting and out-of-furnace treatment of steel]: TNT, 290 (in Russian).

---

Received 28 October 2016  
Approved 07 February 2017  
Available in Internet 17 March 2017