

УДК 669.184.046.512:001.891.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ НА БАЗЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ*

Колесников Ю.А., к.т.н., доцент кафедры технологий металлургии

и литейных процессов (dixord@mail.ru)

Бигеев В.А., д.т.н., профессор кафедры технологий металлургии

и литейных процессов (v.bigeev11@yandex.ru)

Сергеев Д.С., аспирант кафедры технологий металлургии

и литейных процессов (dixord@mail.ru)

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. В данной статье приводится описание работы программы, реализующей метод расчета параметров выплавки стали в кислородном конвертере с верхней подачей дутья. Программа создана на основе системы балансовых уравнений, решаемых совместно методом итераций. Для адаптации модели используется информация о составе и количестве материалов, продуктов плавки и продолжительности операций, имеющаяся в базе паспортных данных плавков кислородно-конвертерного цеха. В этих условиях при определении состава и количества шлака, масса железа, принимающая участие в процессах шлакообразования, рассчитывается по балансу кислорода с учетом общего расхода дутья, зафиксированного АСУ ТП в паспортах плавки. Программа позволяет прогнозировать параметры плавки при изменении ее начальных и конечных условий, а также определять значение неконтролируемых воздействий на процесс в структурированной области базы данных. В программе на первом этапе составляются балансовые уравнения. Определяется расход кислорода на продувку, идущего на шлакообразование. Затем определяется количество окислившихся элементов и рассчитывается потребность в кислороде на окисление. Далее по разности общего отданного на продувку кислорода и пошедшего на окисление элементов определяется его количество, идущее на окисление железа, переходящего в шлак. Затем определяется количество шлака с учетом всех шлакообразующих материалов и окислившегося железа за счет кислорода дутья. На втором этапе рассчитывается баланс образования газов и оксидов железа. На третьем этапе рассчитывается количество шлака с учетом расхода каждого материала. На четвертом этапе рассчитывается количество получаемого металла. На конечном этапе составляется материальный и тепловой баланс (сколько пришло тепла, сколько выделилось в процессе окисления элементов и сколько ушло с нагретым до температуры металла и шлака газом). Тепловой баланс считается относительно комнатной температуры, что позволяет для химических реакций учитывать стандартные тепловые эффекты. Материальный и тепловой балансы настраивались по температуре металла в конце продувки.

Ключевые слова: кислородно-конвертерный процесс, выплавка стали, программа, математическая модель, моделирование, параметры плавки, шихтовые материалы, сидеритовая руда.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-698-705

Для количественной характеристики металлургических процессов в агрегатах и устройствах часто используется математическое моделирование, основанное на физико-химических закономерностях пирометаллургических реакций и особенностях тепловых процессов рассматриваемой системы, используя информацию о ее начальном и конечном состоянии. Основу такой модели составляют балансовые уравнения, учитывающие количество, состав, свойства исходных материалов и продуктов процесса. Эти уравнения, количество которых зависит от числа определяемых параметров, решаются совместно разными способами [1 – 4].

В среде электронных таблиц Microsoft Excel удобно для этого использовать метод итераций. Метод основан на сопоставлении принятых и расчетных значений параметров. Если расхождение между ними не больше

заданной величины, расчет продолжается. В противном случае заданная величина изменяется на определенный шаг и расчет повторяется [1, 3].

Для выплавки стали в кислородном конвертере по схеме, приведенной на рис. 1, моделирование проведено из расчета расхода материалов и продуктов плавки в килограммах на 100 кг металлической шихты (сумма расходов чугуна и лома равна 100 кг). Предварительно задается масса лома с сопутствующими материалами (мусором и окалиной). Определяется масса химических элементов в металлошихте, содержание которых в чугуне и ломе должны быть известны [1 – 3].

После этого определяется остаточное количество химических элементов в жидком металле в конце продувки из балансовых соотношений между исходными материалами и продуктами плавки (металлом, шлаком и газом). Количество металла и шлака при этом предварительно задается [1, 3, 5].

* Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России № 11.8979.2017/БЧ.

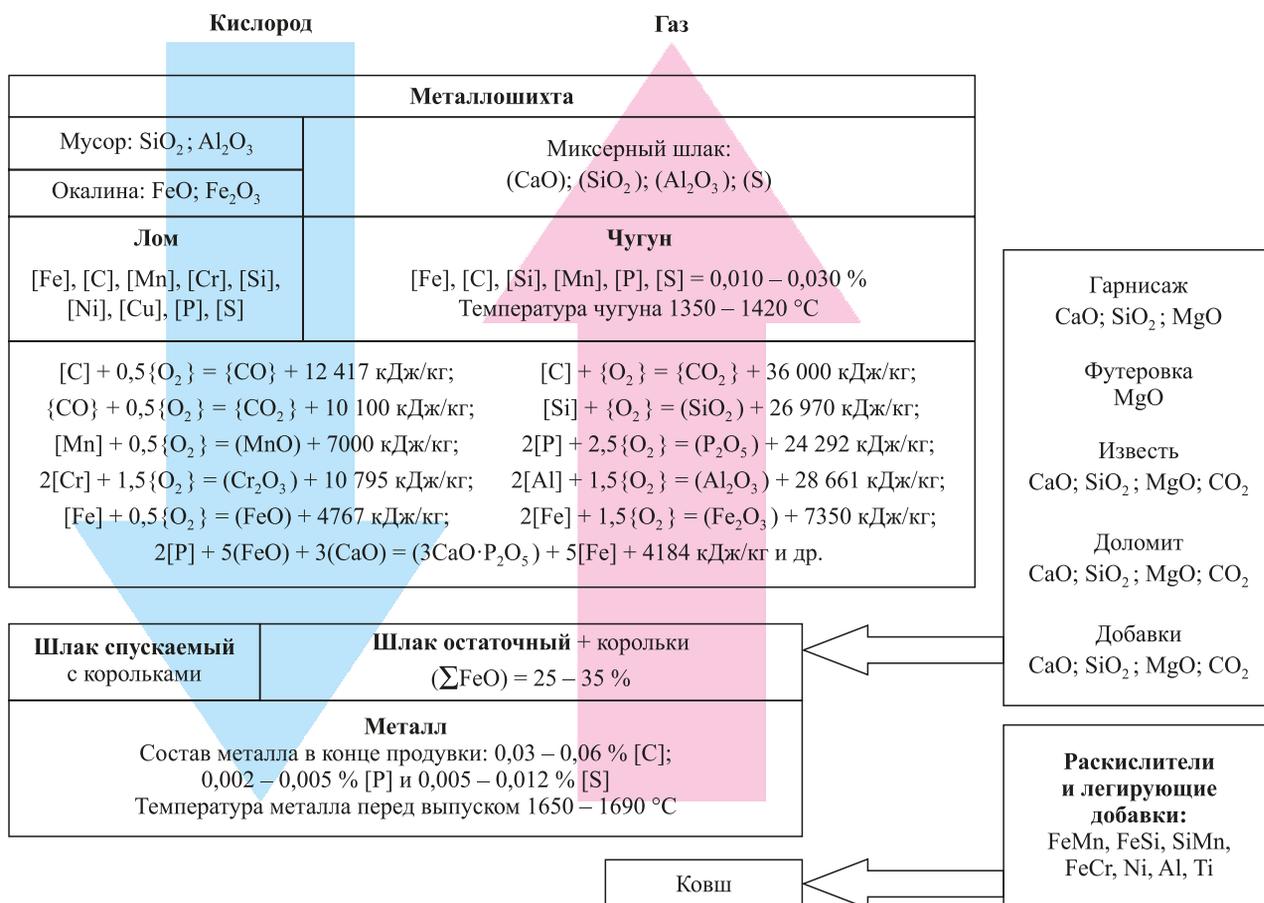


Рис. 1. Схема материальных и энергетических потоков выплавки стали в кислородном конвертере

Fig. 1. Scheme of the material and power streams of steel smelting in BOF

Далее по разности количества элементов в металлошихте и металле конца продувки определяется число удаляемых за время продувки химических элементов. Используя химические реакции между элементами и кислородом дутья, определяется общий расход дутья (м³) по уравнению [5 – 7]

$$V_{\text{д}} = \left(\frac{100}{O_2^{\text{д}}} + \frac{O_2^{\text{пот}}}{100} \right) \left[(V_{O_2}^{\text{C}}) + (V_{O_2}^{\text{Si}}) + (V_{O_2}^{\text{Mn}}) + (V_{O_2}^{\text{P}}) + (V_{O_2}^{\text{S}}) + (V_{O_2}^{\text{V}}) + (V_{O_2}^{\text{Cr}}) + (V_{O_2}^{\text{Fe}}) - (V_{O_2}^{\text{др}}) \right],$$

где O₂^д – содержание кислорода в дутье, %; O₂^{пот} – потери дутья, %; (V_{O₂}^C), (V_{O₂}^{Si}), (V_{O₂}^{Mn}), (V_{O₂}^P), (V_{O₂}^S), (V_{O₂}^V), (V_{O₂}^{Cr}), (V_{O₂}^{Fe}) – расход кислорода на окисление соответствующего химического элемента, м³; (V_{O₂}^{др}) – поступление кислорода с оксидами железа неметаллических материалов, м³.

Затем определяется выход газа (м³) за период продувки, как образующийся при окислении элементов металлической шихты (углерод, сера), так и поступлении из неметаллических материалов и части неусвоенного кислородного дутья [5 – 7]:

$$V_{\text{г}} = V_{\text{CO}} + V_{\text{CO}_2} + V_{\text{O}_2}^{\text{пот}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}.$$

В этом уравнении при определении количества газа, образующегося при окислении углерода в виде CO и CO₂, неопределенной величиной является доля массы углерода, окисляющегося до этих оксидов в реакционной зоне, а также доля CO, дожигаемая до CO₂ за пределами зоны. Эти величины задаются, а при адаптации модели служат объектами настройки на реальные условия [4, 6].

Следующим этапом моделирования является определение выхода жидкого металла (кг) в конце продувки [5 – 7]:

$$g_{\text{м}} = g_{\text{ч}} + g_{\text{л}} + \frac{56}{72} \sum (\text{FeO})_{\text{др}} + \frac{112}{160} \sum (\text{Fe}_2\text{O}_3)_{\text{др}} - \sum \Delta[E] - 0,01g_{\text{ш}} \left[\frac{56}{72} (\text{FeO}) + \frac{112}{160} (\text{Fe}_2\text{O}_3) \right] - \frac{V_{\text{г}} V_{\text{п}} \text{Fe}_{\text{п}}}{100} - 0,01g_{\text{ш}} g_{\text{кор}} - \frac{1000}{100} - g_{\text{выбр}},$$

где g_ч, g_л – массы чугуна и лома на плавку соответственно, кг; ∑(FeO)_{др}, ∑(Fe₂O₃)_{др} – массы FeO и Fe₂O₃ в неметаллических материалах соответственно, кг; ∑Δ[E] – масса окислившихся за период продувки химических элементов, кг; g_ш – масса шлака, кг; (FeO),

(Fe_2O_3) – содержание в шлаке соответствующих оксидов железа, %; $g_{\text{кор}}$ – содержание капель металла (корольков) в шлаке, %; $V_{\text{п}}$ – запыленность конвертерного газа, г/м^3 ; $\text{Fe}_{\text{п}}$ – содержание железа в конвертерной пыли, %; $g_{\text{выбр}}$ – потери металла с выносами и выбросами, %.

Большинство величин, входящих в это уравнение, не контролируется и задается на начальном этапе моделирования. В дальнейшем они служат объектами настройки модели на реальные условия [7, 8].

Сравнивается расчетный выход жидкого металла с заданным. При отклонении более, чем 0,01, необходимо вернуться к началу расчета и изменить заданное значение. При совпадении результата с заданной точностью расчет продолжается.

Определяется расход извести по уравнению [5 – 7]

$$g_{\text{из}} = \frac{100}{\text{CaO}_{\text{из}} - B(\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5)_{\text{из}}} \times \left[B \left(\frac{60}{28} \Delta[\text{Si}] + \frac{142}{62} \Delta[\text{P}] + g_{\text{SiO}_2}^{\text{др}} \right) - g_{\text{CaO}}^{\text{др}} \right],$$

где B – основность шлака, $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5}$; $g_{\text{из}}$ – расход извести, кг; $\text{CaO}_{\text{из}}$, $(\text{SiO}_2)_{\text{из}}$, $(\text{P}_2\text{O}_5)_{\text{из}}$ – содержание в извести соответствующих оксидов, %; $\Delta[\text{Si}]$, $\Delta[\text{P}]$ – масса кремния и фосфора, окислившихся за период продувки, кг; $g_{\text{SiO}_2}^{\text{др}}$ – количество $(\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5)$, поступающих из всех источников, кроме металлической шихты и извести, кг; $g_{\text{CaO}}^{\text{др}}$ – то же, оксида кальция, кг.

Фактический расход извести зависит от степени ее усвоения φ ($\varphi = 0,85 - 0,95$).

Определяется количество шлака $g_{\text{ш}}$, кг [5 – 7]:

$$g_{\text{ш}} = \frac{100}{100 - (\Sigma \text{FeO})} \left(\frac{60}{28} \Delta[\text{Si}] + \frac{142}{62} \Delta[\text{P}] + \frac{71}{55} \Delta[\text{Mn}] + \frac{182}{102} \Delta[\text{V}] + \frac{152}{104} \Delta[\text{Cr}] + g_{\text{ш}}^{\text{др}} \right),$$

где $g_{\text{ш}}^{\text{др}}$ – количество шлакообразующих компонентов без оксидов железа, вносимых материалами, кроме металлической шихты, кг; $(\Sigma \text{FeO}) = (\text{FeO}) + (\text{Fe}_2\text{O}_3)$, %.

Сравнивается расчетный выход шлака с заданным. При отклонении более, чем 0,01, необходимо изменить предварительно заданное значение и повторить расчет. При совпадении результата с заданной точностью расчет продолжается.

Определяется температура металла в конце продувки $t_{\text{м}}$, °С. Для этого рассчитываются статьи теплового баланса плавки [5 – 7]:

$$t_{\text{м}} = \frac{q_{\text{прих}} - q_{\text{расх}} - 54,8(g_{\text{м}} + 0,01g_{\text{ш}}g_{\text{кор}}) + 1710g_{\text{ш}}}{0,84(g_{\text{м}} + 0,01g_{\text{ш}}g_{\text{кор}}) + 2,09g_{\text{ш}}}.$$

Здесь $q_{\text{прих}}$, $q_{\text{расх}}$ – сумма приходных и расходных статей теплового баланса соответственно, кДж.

Расчет теплового баланса ведется относительно комнатной температуры, что позволяет для химических реакций учитывать стандартные тепловые эффекты.

Сравнивается расчетная температура с заданной. При отклонении более, чем на один градус, необходимо вернуться к началу расчета и изменить заданное значение расхода лома на плавку. При совпадении результата с заданной точностью расчет продолжается.

Определяется расход материалов для раскисления стали во время ее выпуска из конвертера в сталеразливочный ковш по уравнению, кг [5 – 7]

$$\text{Fe}E = \frac{100g_{\text{м}}([E]_{\text{к}} - [E]_{\text{м}})}{E_{\text{Fe}E}(100 - U_E)},$$

где $\text{Fe}E$ – расход ферросплава, кг; $[E]_{\text{к}}$ – содержание элемента в металле после раскисления, %; $[E]_{\text{м}}$ – содержание элемента в металле в конце продувки, %; $E_{\text{Fe}E}$ – содержание элемента в ферросплаве, %; U_E – угар элемента при раскислении, %.

Для адаптации математической модели к реальным условиям формируется база производственных данных из паспортов плавов для определенного конвертера и группы марок стали.

Так, для условий конвертерного цеха ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) для настройки модели использовали паспортные данные при производстве трубных сталей класса прочности К60 (Х70) плавов, проведенных с ноября 2013 г. по январь 2014 г. Паспортные данные по этим сталям наиболее полные и с высокой вероятностью достоверные. Проведена минимизация отклонений фактических и расчетных значений контролируемых параметров плавки по методу В.Н. Селиванова, схема которого представлена на рис. 2 [1, 9, 10].

Программа расчета (А.с. 2015660834 РФ) реализована в среде электронных таблиц Microsoft Excel, интерфейс которой представлен на рис. 3. При этом была проведена структуризация этапов расчета в виде интерфейсных блоков с подробными пояснениями в областях ввода исходных данных и вывода получаемых расчетом параметров плавки, что позволило достичь простоты и удобства использования на интуитивно понятном уровне.

На одном листе электронной таблицы предоставлена вся структура задаваемых изначально данных и рассчитываемых параметров плавки. Кроме того, усовершенствована компактность и наглядность интерфейса, включая реализацию цветового разделения входных и выходных данных. Так, входные параметры плавки обозначаются синим цветом, а рассчитываемые – зеленым. Неконтролируемые параметры, за счет которых настраивается модель и которые можно изменять в заданных пределах, выделены красным цветом. Форма представления данных максимально приближена к виду отображения в паспортах плавов.

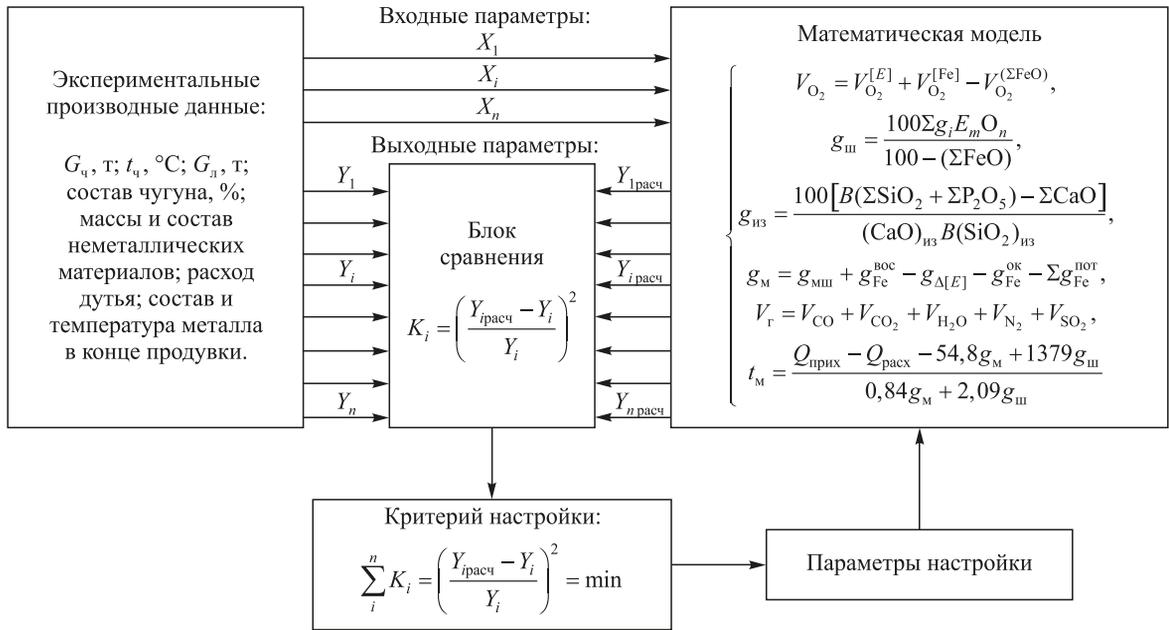


Рис. 2. Схема адаптации математической модели по методу Селиванова В.Н.

Fig. 2. Diagram of mathematical model adaptation by Selivanov method

ИСХОДНЫЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ									
Таблица 1 - Состав металлургических материалов, %									
Хим. элементы	Чугун	Лом (объемные отходы, обрез)	Сталь до раскисления	Доп-ый мет-ый материал	Коэффициент	Сталь до раскисления	Расчетный состав лома		
Углерод [C]	4,715	0,200	0,054	0,000					
Кремний [Si]	0,760	0,250	0,000	0,000					
Марганец [Mn]	0,262	0,400	0,053	0,000	43,523	0,061			
Сера [S]	0,019	0,030	0,020	0,000	2,388	0,013			
Фосфор [P]	0,063	0,030	0,008	0,000	109,523	0,009			
Хром [Cr]	0,040	0,070	0,025	0,000	9,740	0,038			
Никель [Ni]	0,010	0,074	0,020	0,000	0,000	0,020	0,077		
Мель [Cu]	0,014	0,292	0,054	0,000	0,000	0,053	0,302		
Ванадий [V]	0,131	0,100	0,001	0,000	1704,940	0,001			

Таблица 2 - Характеристика мет-х материалов, т									
Расход лома									50,0
Расход чугуна									360,0
Сумма исходной металлошхты									410,0
Заданная масса стали до раскисл.									368,8
Расход зашлакованного скрапа									0
Доля шхака в скрапе, %									30
Расход доп-го мет-го материала									0
Доля мусора в доп-ом мет-ом материале, %									0

Таблица 3 - Состав и расход шлакообразующих материалов, загружаемый до и во время продувки, %											
Компоненты	Известь	Известняк	Гарнисаж	Шлак с чугуном	Поступает с ломом окалина	Мусор доп-го мет-го материала	Футеровка	Сидерит сырой	Окепел. доломит	Окатыши	Доп-ый материал 1
CaO	89,15	51,20	39,37	36,30	35,00	0,00	4,00	3,60	60,00	4,68	0,00
SiO2	2,00	0,80	16,34	45,00	60,00	0,00	1,00	5,70	2,60	3,70	0,00
MgO	4,81	3,20	10,75	0,00	0,00	0,00	95,00	12,00	25,00	2,50	0,00
MnO	0,10	0,50	2,67	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00	0,21	0,00
FeO	0,00	0,00	20,38	0,50	0,00	60,00	0,00	37,20	0,00	1,72	0,00
Fe2O3	0,00	0,30	3,50	0,00	0,00	40,00	0,00	2,80	8,00	81,92	0,00
Al2O3	0,50	0,50	1,96	15,00	5,00	0,00	0,00	1,90	4,00	2,26	0,00
CaF2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2O5	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00
S	0,03	0,20	0,03	0,30	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,02	0,00
Cr2O3	0,00	0,00	0,27	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V2O5	0,00	0,00	1,92	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	0,00
SnO2	0,00	0,00	0,02	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,42	0,00
CO2	3,41	42,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,47	0,40	0,00	0,00
H2O	0,00	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,00	0,00
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
Расход, % к массе металлошхты	2,95	0,00	3,00	0,40	7,00	0,50	0,00	0,15	1,71	3,06	0,00
Примечание				% к массе чугуна	% к массе лома						
Допуски			(2-4)	(0,3-0,5)	(1-3)	(0,5-2)		(0,05-0,3)		(2-5)	(0-0,5)

Таблица 3.1 - Состав и расход добавочных металлургических материалов для маршевки гарнисажа (относится на шлак после продувки), %					
Компоненты	СМГ	ФОМ	ФМБУЖ	Сыр. доп.	Атомфлос
CaO	2,00	6,00	3,00	30,50	2,80
SiO2	1,00	2,00	2,50	0,20	2,80
MgO	55,00	86,00	80,00	21,50	72,00
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe2O3	0,00	5,00	6,00	0,50	6,00
Al2O3	0,00	0,00	0,00	0,30	5,00
CaF2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P2O5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,50	0,00	0,20
Cr2O3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблица 3.2 - Расход шлакообразующих материалов, т			
Компоненты	До продувки	Продувка	После продувки
Известь	2,97	9,12	
Ож. Доломит	4,40	8,16	
СМГ			
ФОМ			
Атомфлос		0,56	0,19
Известняк			
Сидерит		7,00	
Окатыши			
ФМБУЖ			
Сыр. доп.			
Доп-ый материал 1			

Таблица 4 - Доля элементов	
Элемент	Доля
Окисл.	
Fe	
Доля	
С	
Со	
Ср	
По	

Рис. 3. Интерфейс программы расчета параметров плавки

Fig. 3. Interface of the calculation program of smelting parameters

В табл. 1, 2 представлены результаты расчета материального и теплового балансов выплавки трубных сталей по адаптированной математической модели.

Благодаря данной программе, появилась возможность решения исследовательских задач по оценке ис-

пользования таких материалов, как сидеритовая руда, зашлакованный скрап и другие металлические и неметаллические материалы.

Перед расчетом вводятся необходимые исходные данные, выделенные синим и красным цветом.

Таблица 1

Материальный баланс плавки

Table 1. Material balance of smelting

Приход	Количество		Расход	Количество	
	т	%		т	%
Чугун жидкий	322,00	80,04	Сталь	350,76	87,19
Лом металлический	80,30	19,96	Шлак	68,25	16,97
Металлошихта	402,30	100,00	СО	31,00	7,71
Известь	18,34	4,56	СО ₂	10,66	2,65
Известняк	6,45	1,60	Корольки	6,83	1,70
Доломит: ожезненный сырой	8,50 4,31	2,11 1,07	Потери с пылью	7,43	1,85
			Потери дутья	0,71	0,18
			Потери железа	8,05	2,0
Флюс ФМБУЖ	1,02	0,25	Невязка	0,09	0,02
Кислород	30,19	7,50			
Футеровка	0,60	0,15			
Гарнисаж	12,07	3,00			
Сумма	483,79			483,79	

Таблица 2

Тепловой баланс плавки

Table 2. Heat balance of smelting

Приход	%	Расход	%
Физическое тепло чугуна	51,03	Тепло на нагрев: металла (1680 °С) шлака газа	63,55 14,99 9,62
Тепло окисления:			
углерода	24,70		
кремния	8,61	На разложение: оксидов железа карбонатов	2,27 2,18
марганца	0,89		
фосфора	0,57		
хрома	0,18		
железа	9,07	Тепло на нагрев: пыли выносов и выбросов	1,05 1,35
Тепло шлакообразования	4,33		
Тепло миксерного шлака	0,23	Потери тепла	5,00
Тепло дожигания СО	0,41		
Сумма	100,00	Сумма	100,00

Особенностью данной модели является определение количества железа, поступающего в шлак во время продувки, по балансу кислорода (по разности отданного на продувку кислорода и израсходованного на окисление элементов).

Количество и состав шлака конца продувки определяются с учетом расхода каждого материала и количества окислившегося железа за счет кислорода дутья.

Для этого используются имеющиеся данные: масса чугуна и лома, содержание компонентов в чугуне и ломе и др.

Другая особенность расчета состоит в том, что масса лома в начале расчета еще не известна, поскольку она определяется из теплового баланса, который в свою очередь рассчитывается с использованием массы лома, чугуна и металла. Следовательно, составляется система уравнений, но решаемых не совместно, а методом подбора определенного значения для этой системы и проверки его на соответствие данным уравнениям. Подбор данного значения ведется до тех пор, пока не будет достигнуто определенное соответствие в заданных пределах. Основным критерием при этом выступает температура жидкого металла.

Выход жидкого металла определяется по балансу железа.

Материальный и тепловой балансы настраиваются по температуре металла в конце продувки с целью получения необходимой информации о неконтролируемых параметрах.

Например, подаваемая известь не приносит тепла, но в ней присутствует разлагающийся при высокой температуре карбонат, у которого берется стандартный тепловой эффект (из справочника) и рассчитывается на 1 кг CO_2 [11 – 13]. Компоненты подаваемой в конвертер извести (CaO , SiO_2 , MgO и др.), по мере ее растворения, переходят в шлак, нагревающийся до температуры, близкой к температуре металла в конце продувки. То же самое касается и других неметаллических материалов (ожелезненный доломит, известняк, сидерит и др.) [9, 10, 14, 15].

В расходной части теплового баланса рассчитывается тепло не на нагрев неметаллических материалов (извести, ожелезненного доломита, известняка и др.) до температуры выпуска металла, а тепло на нагрев шлака. Оно определяется как совокупность всех компонентов, поступающих из этих материалов (CaO , SiO_2 и др.) в составе нагреваемого шлака с учетом его теплоемкости, при определении которой используются усредненные данные [9, 16, 17].

Недостатком модели является использование при расчете статей теплового баланса усредненных эмпирических данных по изменению теплосодержания шлака и газов от температуры [18, 19].

При расчетах параметров плавки по модели с использованием сидерита в качестве дополнительного охладителя и шлакообразующего материала, теплоты разложения его карбонатов рассчитывались через окси-

ды CaO , MgO , MnO , FeO (теплоты по окислению элементов брались из справочника) [17, 18, 20, 21].

При оценке возможности использования скрапа из шлаковых отвалов в качестве железосодержащего материала и дополнительного охладителя в модели учитывалось, что зашлакованный скрап на основе статистических данных Центральной лаборатории ОАО «ММК» состоит на 50 % из металла и 50 % шлака (в программе для этого используется рассчитываемый состав шлака). Состав скрапа рассчитывается по химическому составу металлической части, как обычный лом, а по шлаковой составляющей – как конвертерный шлак конца продувки.

Одним из этапов исследований стал анализ возможности применения сидеритовой руды в качестве охладителя кислородно-конвертерной плавки. Расчеты показали, что 8 т сидеритовой руды могут заменить 8,3 т известняка и 7,6 т ожелезненного доломита. За счет дополнительного прихода железа из сидеритовой руды выход жидкого металла на каждой плавке повышается на 3 т (рис. 4).

Также были определены охлаждающие эффекты различных материалов, используемых на плавку. Для рассматриваемых условий установлено, что 1 % металлического лома и ожелезненного доломита снижает температуру металла в среднем на 14 °С, известняка – на 28 °С, сырого доломита – на 31 °С, окатышей – на 50 °С и сидерита – на 37 °С. По охлаждающему эффекту 1 т сидерита заменяет 2,6 т металлического лома или 1,3 т известняка.

По программе проведены расчеты для условий ПАО «Челябинский металлургический комбинат», в сталеплавильном производстве которого затем были успешно пройдены промышленные испытания около 850 т сырой сидеритовой руды крупностью 20 – 60 мм по

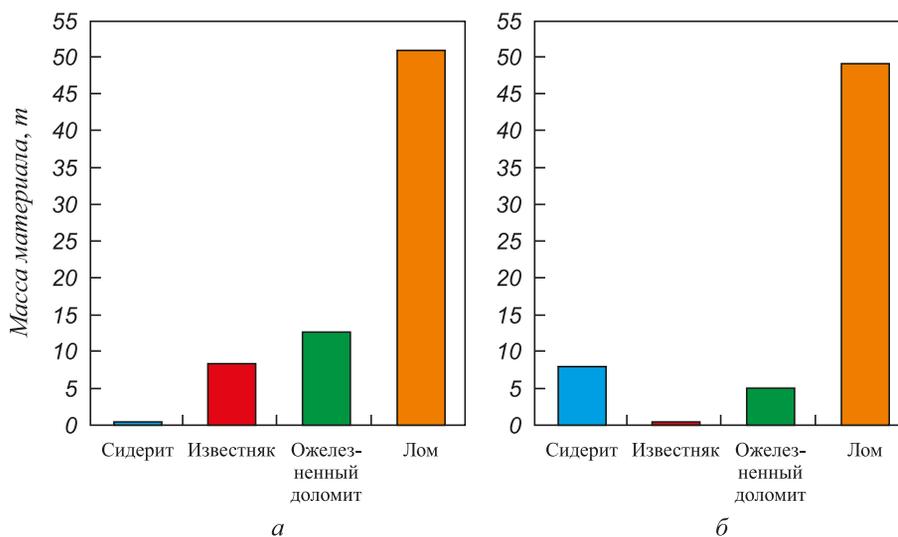


Рис. 4. Расход материалов-охладителей, используемых в конвертерной плавке: базовая технология выплавки стали (а); технология выплавки стали с использованием сидерита (б)

Fig. 4. Consumption of the materials-coolers used in converter smelting using the basic technology (a) and the technology with siderite (b) in the smelting of steel

рабочей программе «Опробование технологии производства стали с использованием опытных охладителей и шлакообразующих материалов».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бигеев В.А., Колесников Ю.А. Прогнозирование технологических параметров выплавки стали в конвертере с использованием сидерита // Теория и технология металлургического производства: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2011. Вып. 11. С. 30 – 36.
2. Бигеев В.А., Колесников Ю.А., Сергеев Д.С. Состояние и перспективы использования сидеритовых руд бакальского месторождения в черной металлургии // Теория и технология металлургического производства: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2013. Вып. 1(13). С. 6 – 8.
3. Колесников Ю.А., Бигеев В.А., Сергеев Д.С. Расчет технологических параметров выплавки стали в конвертере с использованием различных охладителей // Теория и технология металлургического производства: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2014. Вып. 2(15). С. 45 – 47.
4. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оженко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. – М.: Металлургия, 1980. – 162 с.
5. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: Учебник для вузов. – М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. – 528 с.
6. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Внепечная металлургия стали. Т. 3. – М.: Теплотехник, 2010. – 424 с.
7. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки / О.Б. Исаев, Е.А. Чичкарев, В.В. Кислица и др. – М.: Металлургиздат, 2008. – 243 с.
8. Казаков А.А., Ковалев П.В., Рябшук С.В. Исследование термовременной природы неметаллических включений с целью повышения металлургического качества высокопрочных трубных сталей // Черные металлы. 2009. № 12. С. 4 – 11.
9. Столяров А.М., Селиванов В.Н. Технологические расчеты по непрерывной разливке стали: Учебное пособие. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. – 64 с.
10. Бигеев В.А., Колесников Ю.А., Сергеев Д.С. Модель управления конвертерной плавкой стали // Приложение математики в экономических и технических исследованиях: Сб. науч. тр. / Под ред. В.С. Мхитаряна. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2016. С. 283 – 294.
11. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки. – М.: Теплотехник, 2008. – 487 с.
12. Угрюмов С.А., Боровский А.Б. Реализация программного управления на базе персонального компьютера // Изв. Южного федерального университета. Технические науки. 2005. Т. 45. № 1. С. 131 – 147.
13. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. – М.: Наука, 1981. – 614 с.
14. Dyubanov V.G., Leontiev L.I About the problem of recycling of zinc-containing metallurgical slimes // Rare Metals. 2009. Vol. 28. Spec. Issue. Oct. P. 752 – 770.
15. Окорочков Б.Н., Явойский В.И. Некоторые закономерности кислородно-конвертерного процесса // Теория и технология новых процессов производства стали. Сб. № 48. – М.: Металлургия (МИСиС), 1983. С. 166 – 175.
16. Окорочков Б.Н., Коминов С.В., Ронков Л.В. и др. Динамическая модель конвертерного процесса, отражающая его физико-химические потоки и их взаимодействие. – В кн.: Исследование процессов производства стали и их влияния на конечные свойства продукции. – М.: Металлургия (МИСиС), 1990. С. 5 – 23.
17. Нам В.В., Ронков Л.В., Окорочков Б.Н. и др. Система динамического контроля и управления конвертерным процессом шлакообразования // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 1988. № 9. С. 41 – 42.
18. Горкуша Д.В., Комолова О.А., Григорович К.В. Анализ причин повышенного содержания углерода и азота в стали класса IF для условий ОАО «ММК» // Теория и технология металлургического производства: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.А. Бигеева. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2015. Вып. 1 (16). С. 60 – 64.
19. Горкуша Д.В., Комолова О.А., Григорович К.В. Анализ технологии выплавки и внепечной обработки стали класса IF для условий ОАО «ММК» // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2015. Т. 1. № 1. С. 67 – 70.
20. Комолова О.А., Горкуша Д.В., Григорович К.В. Физико-химические модели технологии рафинирования стали в вакууматоре // V Междунар. конф.-школа по химической технологии: Сб. тез. докл. сателлитной конф. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: В 3-х томах. – Волгоград: Изд-во Волгоградский гос. техн. ун-та, 2016. С. 240 – 242.
21. Колокольцев В.М., Ключковский С.П., Смирнов А.Н., Савченко И.А. Разработка принципиальных основ технологии комплексной переработки высокомагнезиальных сидеритов // Физико-химическая геотехнология. Матер. науч. конф. – М.: 2013. Т. 2. С. 41 – 44.

Поступила 14 ноября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 9, pp. 698–705.

MODELING OF STEELMAKING IN BOF BASED ON PHYSICAL, CHEMICAL AND THERMAL PROCESSES

Yu.A. Kolesnikov, V.A. Bigeev, D.S. Sergeev

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov,
Magnitogorsk, Russia

Abstract. Description of the program realizing a computational method of parameters of steel smelting in the oxygen converter with top feed of blasting is provided in this article. This program was created on the basis of system of the balance equations solved in unison by method of iterations. For adaptation of the model the information on structure and amount of materials, products of melting and duration of operations which is available in passport data on heats of the BOF shop, is used. In these conditions when determining structure and amount of slag, the

mass of iron in scorification processes can be calculated on an oxygen balance taking into account the common expense of the blasting recorded by industrial-control system in passports of heats. The program allows to predict melting parameters at change of its starting and terminating conditions, and also to define value of uncontrollable impacts on process in structured part of the database. At the first stage the program works out the balance equations. The oxygen consumption on blasting going for scorification is defined. Then quantity of the oxidized elements is determined and the volume of oxygen for oxidation is calculated. Further its quantity which went for oxidation of the iron passing into slag is determined by a difference of the common amount of oxygen given on blasting and which went for oxidation of elements. Later the amount of slag is defined with all slag-forming materials and

amount of the oxidized iron at the expense of blasting oxygen. At the second stage the balance of formation of gases and oxides of iron is calculated. At the third stage the amount of slag is determined taking into account the consumption of each material. At the fourth stage the amount of the received metal is calculated. At a terminating stage the mass and heat balance is formed (how many heat came, how many it was allocated in the course of elements oxidation and how many of it was left with the gas heated to temperature of metal, slag). The heat balance is considered according to ambient temperature that allows considering reference heat effects for chemical reactions. The mass and heat balance were adjusted on metal temperature at the end of blasting.

Keywords: oxygen and converter process, smelting of steel, program, mathematical model, model operation, melting parameters, charge, siderite ore.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-698-705

REFERENCES

1. Bigeev V.A., Kolesnikov Yu.A. Prediction of technological parameters of steel smelting in BOF with siderite use. In: *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhregion. sb. nauch. tr.* [Theory and technology of metallurgical production: interregion]. Kolokol'tsev V.M. ed. Magnitogorsk: MGTU, 2011, Issue 11, pp. 30–36. (In Russ.).
2. Bigeev V.A., Kolesnikov Yu.A., Sergeev D.S. State and prospects of the use of Bakalsky siderite ores in ferrous metallurgy. In: *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhregion. sb. nauch. tr.* [Theory and technology of metallurgical production: interregion]. Kolokol'tsev V.M. ed. Magnitogorsk: MGTU, 2013, Issue 1(13), pp. 6–8. (In Russ.).
3. Kolesnikov Yu.A., Bigeev V.A., Sergeev D.S. Calculation of technological parameters of steel smelting in BOF using various coolers. In: *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhregion. sb. nauch. tr.* [Theory and technology of metallurgical production: Interregion reference book]. Kolokol'tsev V.M. ed. Magnitogorsk: MGTU, 2014, Issue 2(15), pp. 45–47. (In Russ.).
4. Yavoiskii V.I., Rubenchik Yu.I., Okenko A.P. *Nemetallicheskie vklucheniya i svoystva stali* [Nonmetallic inclusions and properties of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 162 p. (In Russ.).
5. Kudrin V.A. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva stali: uchebnik dlya vuzov* [Theory and technology of steel production: Textbook for universities]. Moscow: Mir, AST, 2003, 528 p. (In Russ.).
6. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. Vnepechnaya metallurgiya stali. T. 3* [Production of steel. Ladle metallurgy of steel. Vol. 3]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 424 p. (In Russ.).
7. Isaev O.B., Chichkarev E.A., Kislitsa V.V. etc. *Modelirovanie sovremennykh protsessov vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki* [Modeling of the modern processes of ladle processing and continuous casting]. Moscow: Metallurgizdat, 2008, 243 p. (In Russ.).
8. Kazakov A.A., Kovalev P.V., Ryaboshuk S.V. Research of the thermotemporary nature of nonmetallic inclusions to increase in metallurgical quality high-strength pipe steels. *Chernye metally*. 2009, no. 12, pp. 4–11. (In Russ.).
9. Stolyarov A.M., Selivanov V.N. *Tekhnologicheskie raschety po nepreryvnoi razlivke stali: uchebnoe posobie* [Technological calculations on steel continuous casting: Manual]. Magnitogorsk: MGTU, 2011, 64 p. (In Russ.).
10. Bigeev V.A., Kolesnikov Yu.A., Sergeev D.S. Model of control of BOF steel production. In: *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh: sb. nauch. tr.* [Application of mathematics in economic and technical researches: Coll. of sci. papers]. Mkhitaran V.S. ed. Magnitogorsk: MGTU, 2016, pp. 283–294. (In Russ.).
11. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 1. Protsessy vylavki, vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki* [Production of steel. Vol. 1. Processes of smelting, ladle processing and continuous casting]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 487 p. (In Russ.).
12. Ugryumov S.A., Borovskii A.B. Realization of program control on the basis of personal computer. *Izv. Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2005, vol. 45, no. 1, pp. 131–147. (In Russ.).
13. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov* [Reference book on mathematics for engineers and students of universities]. Moscow: Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1981, 614 p. (In Russ.).
14. Dyubyanov V.G., Leontiev L.I. About the problem of recycling of zinc-containing metallurgical slimes. *Rare Metals*. 2009, vol. 28. Spec. Issue. Oct., pp. 752–770.
15. Okorokov B.N., Yavoiskii V.I. Some regularities of BOF process. In: *Teoriya i tekhnologiya novykh protsessov proizvodstva stali. Sb. no. 48* [Theory and technology of new processes of steel production]. Moscow: Metallurgiya (MISiS), 1983, pp. 166–175. (In Russ.).
16. Okorokov B.N., Kominov S.V., Ronkov L.V. etc. Dynamic model of converter process reflecting its physical and chemical streams and their interaction. In: *Issledovanie protsessov proizvodstva stali i ikh vliyaniya na konechnye svoystva produktsii* [Research of steel-making processes and their influence on terminating properties of production]. Moscow: Metallurgiya (MISiS), 1990, pp. 5–23. (In Russ.).
17. Nam V.V., Ronkov L.V., Okorokov B.N. etc. System of dynamic monitoring and management of converter process of scorification. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 1988, no. 9, pp. 41–42. (In Russ.).
18. Gorkusha D.V., Komolova O.A., Grigorovich K.V. Analysis of the reasons of increased content of carbon and nitrogen in IF steels in conditions of JSC "MMK". In: *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhregion. sb. nauch. tr.* [Theory and technology of metallurgical production: Interregion coll. of sci. papers]. Bigeev V.A. ed. Magnitogorsk: MGTU, 2015, Issue 1 (16), pp. 60–64. (In Russ.).
19. Gorkusha D.V., Komolova O.A., Grigorovich K.V. Analysis of the technology of smelting and ladle processing of IF steels in conditions of JSC "MMK". In: *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Urgent problems of the modern science, technique and education]. Magnitogorsk: MGTU, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 67–70. (In Russ.).
20. Komolova O.A., Gorkusha D.V., Grigorovich K.V. Physical and chemical models of steel refinement in a vacuum vessel. In: *V mezh-dunarodnaya konferentsiya-shkola po khim. tekhnologii: sb. tezisev dokladov satellitnoi konferentsii XX Mendeleevskogo s'ezda po obshchei i prikladnoi khimii: v 3kh tomakh* [5th Int. Conf.-School on Chemical Technology: Theses of Reports of a Satellite Conf. of the 20th Mendeleevsky Congress in Basic and Applied Chemistry: in 3 vols.]. Volgograd: Izd-vo Volgogradskii gos. tekhn. un-ta, 2016, pp. 240–242. (In Russ.).
21. Kolokol'tsev V.M., Klochkovskii S.P., Smirnov A.N., Savchenko I.A. Development of principal bases of technology of complex processing of high-magnesium siderites. In: *Fiziko-khimicheskaya geotekhnologiya. Materialy nauchnoi konferentsii* [Physical and chemical geotechnology. Materials of a scientific conference]. Moscow: 2013, vol. 2, pp. 41–44. (In Russ.).

Acknowledgements. The results were obtained within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation no. 11.8979.2017/БЧ.

Information about the authors:

Yu.A. Kolesnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Technology of Metallurgy and Foundry Processes" (dixord@mail.ru)
V.A. Bigeev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Technology of Metallurgy and Foundry Processes" (v.bigeev11@yandex.ru)
D.S. Sergeev, Postgraduate of the Chair "Technology of Metallurgy and Foundry Processes" (dixord@mail.ru)

Received November 14, 2016