

УДК 621.385.6:669

© Сущенко А.В.¹, Попов Е.С.², Сидорчук Р.С.³,
Орличенко М.П.⁴, Гриценко А.С.⁵**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ И РАЗРАБОТКА
ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА БАЛАНСА
КИСЛОРОДА КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ**

Выполнен сравнительный анализ известных методик расчета материального и теплового балансов, а также баланса кислорода конвертерной плавки, показаны имеющиеся противоречия и неточности. Разработана усовершенствованная методика и соответствующая прикладная программа для расчета баланса кислорода. Выполнена их адаптация к условиям работы 350-т конвертеров ПАО «МК «Азовсталь»».

Ключевые слова: конвертерная плавка, технический кислород, баланс кислорода, методика расчета, прикладная программа, адаптация.

Сущенко А.В., Попов Е.С., Сидорчук Р.С., Орличенко М.П., Гриценко О.С. Вдосконалення методики та розробка прикладної програми для розрахунку балансу кисню конвертерної плавки. Виконаний порівняльний аналіз відомих методик розрахунку матеріального та теплового балансів, а також балансу кисню конвертерної плавки, показані суперечності та неточності, що маютьсся. Розроблена удосконалена методика та відповідна прикладна програма для розрахунку балансу кисню. Виконана їх адаптація до умов роботи 350-т конверторів ПАТ «МК «Азовсталь»».

Ключові слова: конвертерна плавка, технічний кисень, баланс кисню, методика розрахунку, прикладна програма, адаптація.

A.V. Sushchenko, E.S. Popov, R.S. Sidorchuk, M.P. Orlichenko, O.S. Gritsenko. Perfection of methodology and development of an applied program for calculation of balance of oxygen of the converter melt. The comparative analysis of known methodologies of calculation of material and thermal balances, and balance of oxygen in the converter melting was executed, contradictions and inaccuracies were shown. The improved methodology and corresponding application program for the calculation of balance of oxygen are designed. Their adaptation to the operation conditions of 350mt converters of PAS «МК «Azovsteel» was executed.

Keywords: converter melting, technical oxygen, balance of oxygen, methodology of calculation, application program, adaptation.

Постановка проблемы. Блок расчета расхода кислорода дутья на плавку (включающий соответствующие методики и алгоритмы) является одной из основных составляющих специального программного обеспечения автоматизированной системы динамического контроля и управления кислородно-конвертерным процессом. Совместно с подсистемами газового анализа и прогнозирования содержания углерода в металлическом расплаве он определяет момент окончания продувки плавки и используется для непрерывной корректировки настроечных коэффициентов расчетных моделей (статической и динамической) по различным каналам обратной связи. При управлении процессом машинистом дистрибутора

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² директор по технологии и качеству ПАО «МК «Азовсталь» Группы Метинвест, г. Мариуполь

³ начальник технологического управления ПАО МК «Азовсталь» Группы Метинвест, г. Мариуполь

⁴ начальник сталеплавильного отдела технологического управления ПАО МК «Азовсталь» Группы Метинвест, г. Мариуполь

⁵ специалист второй категории ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

в ручном режиме момент окончания продувки плавки определяется по параметрам газового факела (светимости и конфигурации), а также на основе оперативного сравнительного анализа входных и выходных параметров предыдущих и входных параметров текущей плавки. Одним из ключевых регулируемых параметров при этом является суммарный расход кислорода дутья на плавку. Поэтому, применение даже относительно простых (работающих в режиме «советчика») прикладных программ, позволяющих прогнозировать необходимый расход дутья (по входным параметрам текущей плавки, а более точно с использованием базы данных предыдущих плавок), позволяет повысить точность определения момента времени остановки продувки и, как следствие, улучшить технико-экономические показатели плавки. Эффективность работы таких программ существенным образом зависит от адекватности используемой методики расчета баланса кислорода конвертерной плавки. Подробный анализ всех составляющих расходной части этого баланса позволяет выявлять и использовать дополнительные резервы конвертерного процесса, а также правильно нормировать расход технического кислорода (дутья) на плавку в зависимости от параметров шихтовки, используемых материалов, марки выплавляемой стали и особенностей используемой технологии конвертирования чугуна.

Анализ последних исследований и публикаций. Большинство используемых до настоящего времени методик расчета баланса кислорода конвертерной плавки базируются на основных положениях работ [1, 2]. При этом имеющиеся в известных методиках противоречия и неточности могут приводить к значительным погрешностям при вычислениях, а в некоторых случаях даже к неверным выводам при анализе технологических показателей плавки.

Так, например, авторы работ [1, 3] считают, что диоксид углерода CO_2 (потери при прокаливании - ППП), который содержится в недообожженных шлакообразующих материалах - ШОМ (известь, известняк и др.) в процессе конвертерной плавки реагирует с металлическим расплавом, участвуя в окислительных реакциях, что приводит, в конечном итоге, к снижению необходимого расхода кислорода дутья на плавку на величину, равную 80 – 90 % от количества кислорода в ППП ШОМ. Однако, с этим трудно согласиться по следующим причинам:

1) большая часть извести, как правило, подается в конвертер в процессе продувки плавки сверху на шлак. При этом куски извести не погружаются в металл (находятся в верхних слоях шлака) и выделяющийся из них остаточный CO_2 уносится с отходящими газами вверх в полость конвертера и не контактирует с металлическим расплавом;

2) мелкая фракция извести может дообжигаться еще до попадания в ванну – при движении в противотоке с горячими отходящими газами в полости конвертера;

3) при условии, что часть извести может быть загружена на днище конвертера, она частично дообжигается при нагреве от горячей футеровки конвертера (и остатков шлака) до заливки чугуна.

Следует также отметить, что ряд исследователей [2, 4-7] не учитывают влияние ППП извести и других шлакообразующих материалов на расход кислорода дутья на конвертерную плавку, что также является не совсем корректным.

Очевидно, что в некоторых случаях (при отдаче большого количества ШОМ на лом без задержки с заливкой чугуна или на чугун до момента формирования первичного шлака) возможно частичное реагирование CO_2 ППП ШОМ с чугуном. При необходимости учета этого процесса в расчетах (например, при использовании извести шахтных печей, известняка или специальных флюсов с высоким значением ППП) требуется дополнительная информация о режиме присадки ШОМ на каждой плавке. В случае использования материалов с ППП до 5% (например, извести вращающихся печей) влиянием указанного процесса на баланс кислорода конвертерной плавки можно пренебречь: даже при отдаче 60 % всех ШОМ на лом и 100 % - ом реагировании CO_2 с чугуном, изменение расхода кислорода дутья на плавку составит менее 1%.

Авторы [2] считают, что при переходе серы из металла в шлаковую фазу высвобождается кислород из оксидов железа в соответствии с результирующей реакцией:

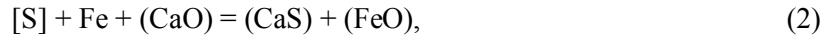


При этом они вычитают массу высвобожденного кислорода от требуемого его расхода на окисление примесей. Это является некорректным по следующим причинам:

1) в соответствии с методиками расчета расхода кислорода [1, 2 и др.] содержание (FeO) в шлаке задается фиксированным значением или определяется по известным выражениям,

например, в зависимости от содержания углерода в металле после продувки, до начала расчета. При этом величина (FeO) и количество кислорода, затраченное на его образование, не зависят от протекания реакции (1);

2) по данным [8 и др.] сера переходит в шлак не по (1) а в соответствии с уравнением реакции десульфурации



т. е. без выделения свободного кислорода.

Сера удаляется из металлического расплава в шлаковую фазу и в газ. В последнем случае на ее окисление (до SO₂) затрачивается кислород. Доля серы (от общего её количества в шихтовых материалах), перешедшей в газовую фазу, по различным данным находится в пределах 5-15% и зависит от большого количества кинетических и термодинамических параметров плавки. В [3, 6, 7] удаление серы в газовую фазу не учитывают.

При расчете расхода кислорода на окисление углерода расплава большинство авторов, в том числе [1-3], принимают, что в смеси газов (CO + CO₂) на выходе из ванны содержится 10% CO₂; отмечается, что эта величина изменяется в диапазоне 5 – 15 (10-15)%. При этом не учитываются тип шихтовки плавки, а также характер протекания процессов обезуглероживания расплава и шлакообразования. В [6] принимают, что в выходящих из ванны газах CO₂ отсутствует; он образуется в полости конвертера за счет расходования всего неусвоенного ванный кислорода дутья на дожигание CO. Автор [1] считает, что неусвоенный кислород дутья дополнительно дожигает 10% CO в отходящих газах над ванной. В соответствии с расчетными схемами [2, 3, 7] неусвоенный кислород дутья не участвует в процессах дожигания CO в полости конвертера, что приводит к неточностям расчета теплового баланса конвертерной плавки.

Следует отметить, что до настоящего времени процессы угара железа «в дым», испарения железа и его оксидов в высокотемпературной реакционной зоне конвертера изучены недостаточно. Так, в [2] принимают, что угар железа «в дым» (до Fe₂O₃) составляет 1,5% от массы металлошихты. Автор [1] при расчете материального и теплового балансов конвертерной плавки его не учитывает. По данным других работ эта величина колеблется от 0,3 до 2,1%, также до конца не ясна природа этого процесса (считают, что железо в пыли отходящих газов находится в виде: чистого Fe, FeO, Fe₂O₃ и их смесей) [9, 10 и др.]. Это может привести к существенным погрешностям при определении расхода кислорода дутья на плавку. Так, при расчете необходимого количества кислорода дутья на додувку конвертерной плавки в [11] отсутствие учета затрат кислорода на окисление железа пыли, как отмечают и сами авторы [11], привело к заметному отличию расчетных и экспериментальных значений расхода дутья.

По мнению авторов работы [11], при определении требуемого расхода кислорода на плавку необходимо учитывать кислород, растворенный в металлическом расплаве конвертерной ванны. Как показывают расчеты, влияние количества растворенного в металле кислорода на суммарный расход кислорода дутья на плавку при содержании углерода в металле после продувки $[C]_{Me} \geq 0,08\%$ пренебрежимо мало. С уменьшением величины $[C]_{Me}$ оно усиливается, однако, даже при $[C]_{Me} = 0,03 - 0,05 \%$, не превышает 1,5%.

В работе [12] справедливо отмечается, что во многих используемых до настоящего времени методиках расчета материального и теплового балансов конвертерной плавки и соответствующих программных решениях устарели исходные данные и ряд расчетных зависимостей. Применяемые, в т.ч. в учебных целях, прикладные программы реализованы в устаревших пакетах программирования, которые в настоящее время не могут дать удобного представления информации. Так не учитываются: особенности конвертерной плавки при использовании: различных видов металлоохлаждителей (одновременно), высокомагнезиальных ШОМ, дополнительных теплоносителей, новых типов кислородных фурм (в т.ч. обеспечивающих интенсификацию дожигания CO в полости агрегата, вдувание порошкообразных материалов), новых видов периклазоуглеродистых огнеупоров, при наличии промежуточного скачивания шлака, выполнении перед плавкой операций факельного торкретирования или/и раздувки струями азота модифицированного конечного шлака на футеровку (нанесение шлакового гарнисажа) и др.

Целью настоящего исследования являлось разработка усовершенствованной методики и прикладной программы для расчета баланса кислорода конвертерной плавки и их адаптация к

условиям работы 350-т конвертеров ПАО «МК «Азовсталь».

Изложение основного материала. Разработанная методика расчета расхода кислорода дутья на конвертерную плавку (и соответствующая прикладная программа ASAG версия 2.1 – для нормирования расхода технического кислорода), в отличие от других известных методик, учитывает: 1) в металлоохлаждителях (МО), кроме основного – лома стального углеродистого, наличие: скрапа, скрапа ошлакованного, чугуна чушкового, лома чугуна, лома «обрезь», легированного лома. Предусмотрена возможность ввода дополнительных МО; 2) в шлакообразующих материалах (ШОМ), кроме основного – извести вращающихся печей, наличие MgO-содержащих флюсов: DALSLAG P-71, PL-66, P55BR, PN-FL60, ОДФ, ОДФ-К50. Предусмотрена возможность ввода дополнительных ШОМ; 3) наличие дополнительного углеродсодержащего материала (УСМ): уголь марок АКО, АО, кокс, «коксовый орешек». Предусмотрена возможность ввода других видов твердого топлива; 4) одновременное участие в плавке до 10 позиций каждого из видов материалов (МО, ШОМ, УСМ); 5) кроме поступления в плавку части футеровки конвертера дополнительно части шлакового гарнисажа на футеровке (при выполнении перед плавкой операции азотной раздувки конечного шлака на стены агрегата) и/или торкретпокрытия (при наличии факельного или полусухого торкретирования).

Методика (прикладная программа) позволяет рассчитать: теоретически необходимый расход дутья (технического кислорода) на плавку, $\text{нм}^3/\text{плавку}$, удельный расход ($\text{нм}^3/\text{т}$ годного металла) и полный баланс технического кислорода. При этом также определяется масса и химический состав конечного шлака.

Исходными данными являются: 1) металлотка (жидкий чугун + лом + дополнительные МО), G_0 , т; 2) масса годного (или жидкого) металла, $G_{\text{год}}$, т; 3) параметры чугуна; удельные расходы ($\text{кг}/\text{т}$ годного): 4) дополнительных (кроме лома стального углеродистого) МО, 5) извести и дополнительных ШОМ, 6) углеродсодержащих материалов; массы ($\text{т}/\text{плавку}$): миксерного (доменного) шлака, $G_{\text{ш.чуг}}$, перешедших в плавку 8) футеровки, $G_{\text{фут}}$ и 9) шлакового гарнисажа, $G_{\text{гарн}}$; 10) химические составы материалов, используемых в конвертерной плавке (МО, ШОМ, УСМ, миксерный (доменный) шлак, футеровка конвертера, шлаковый гарнисаж и др.), задаются в виде – см. рис. 1; 11) чистота технического кислорода, $k_{\text{O}_2, \text{дуть}}$, %; 12) состав металла после продувки.

Наименование материала		Лом стальной углерод	
Fe:	97.02 %	CaO:	0 %
C:	0.2 %	SiO2:	0.7 %
Si:	0.15 %	MgO:	0 %
Mn:	0.5 %	P2O5:	0 %
S:	0.04 %	MnO:	0 %
P:	0.04 %	Al2O3:	0.25 %
Ti:	0 %	FeO:	0.3 %
Cr:	0 %	Fe2O3:	0.7 %
Zn:	0 %	CaF:	0 %
Mo:	0 %	TiO2:	0 %
		CO:	0 %
		CO2:	0 %
		N2:	0 %
		O2:	0 %
		H2O:	0.1 %
		H2:	0 %
		SO2:	0 %
		Сумма:	

Рис. 1 – Окно ввода химического состава материала, используемого в конвертерной плавке

В качестве исходной информации также используются эмпирические и полуэмпирические настроечные коэффициенты модели, которые предварительно определялись на основе анализа данных балансовых плавов и статистической обработки представительных массивов плавов: 13) коэффициент усвоения извести, $k_{изв}$, в долях; 14) коэффициенты усвоения ШОМ, $k_{ШОМ}$; 15) коэффициенты усвоения УСМ, $k_{уголь}$; 16) коэффициент усвоения кислорода дутья, $k_{дутья}$; 17) коэффициент для расчета содержания оксидов железа в шлаке, k_1 ; 18) угар железа в дым, $k_{Fe_{угар}}$, в долях от металлосадки; 19) доля углерода расплава, окисляющегося до CO_2 , Z_{CO_2} ; 20) доля углерода УСМ, окисляющегося до CO_2 , $k_{CO_2, уголь}$; 21) количество серы, переходящее в газовую фазу, $k_{S_{газ}}$, % от общего её количества удаляемого за плавку.

Приходная часть баланса кислорода конвертерной плавки включает в себя две основные составляющие: кислород дутья и кислород оксидов железа, содержащихся в металлошихте, шлакообразующих и других сыпучих материалах, загружаемых в конвертер в процессе плавки. В отдельных случаях также учитывается дополнительный приход кислорода из ППП ШОМ.

Составляющие расходной части баланса кислорода конвертерной плавки: кислород, затраченный на окисление: 1) С расплава; 2) С топлива (угля); 3) Si расплава; 4) Mn расплава; 5) P расплава; 6) S расплава в газовую фазу; 7) Fe расплава с переходом оксидов в шлак; 8) Fe расплава с переходом оксидов «в дым», а также 8) кислород дутья, неувоенный (ванной).

Если в приходной части баланса указывают технический кислород, то в расходную необходимо дополнительно включать 9) примеси кислорода дутья.

Расходы кислорода на окисление примесей расплава (C, Si, Mn, P, S) определяются в соответствии со стехиометрическими коэффициентами результирующих реакций. Для определения доли углерода расплава окисляющегося до CO_2 используется переменный коэффициент Z_{CO_2} . На основе обработки показаний масспектрометрической системы анализа состава отходящих конвертерных газов «ГРАНАТ», с учетом рабочих характеристик дымососа, получено, что при применении обычных (однопоточных) кислородных фурм, значение Z_{CO_2} находится в пределах 8 – 12 % и зависит, прежде всего, от окисленности шлака и температурного режима плавки; оно ближе к верхней границе (из указанного диапазона) при «холодных» шихтовках и высокой окисленности шлака, и ближе к нижней границе при «горячем» ходе процесса и низком содержании оксидов железа в шлаке.

На основе анализа данных различных работ значение коэффициента $k_{S_{газ}}$ принято равным 7,5 %.

Расход кислорода на угар железа «в дым» определяли, с использованием результатов исследований [10 и др.], по формуле:

$$m_{Fe_{дым}}^{O_2} = 0.6 \cdot 100 \cdot k_{Fe_{угар}} \cdot \frac{48}{112}, \quad (3)$$

где 0,6 – эмпирический коэффициент, учитывающий доли железа окисляющегося в FeO и Fe_2O_3 дыма от общего количества угара железа «в дым»; $k_{Fe_{угар}}$ - доля железа (от металлосадки) перешедшего «в дым»; 48/112 – относительное количество кислорода, расходуемого на окисление Fe до Fe_2O_3 , кг O_2 / кг Fe.

Сравнение различных известных зависимостей для определения содержания оксидов железа в шлаке (см. рис. 2) показало, что для сложившихся условий работы ККЦ ПАО «МК «Азовсталь» лучшее совпадение с промышленными данными дает зависимость [3], преобразованная к виду:

$$(FeO)_{шл} = \frac{k_1}{\sqrt[n]{[C]_{ме}}} \sqrt[3]{B}; (Fe_2O_3)_{шл} = \frac{0,4k_1}{\sqrt[n]{[C]_{ме}}} \sqrt[3]{B}, \quad (4)$$

где k_1, n - эмпирические коэффициенты, зависящие от типа шихтовки плавки («горячая», «холодная») вида металлоохлаждителей, организации дутьевого режима, состояния футеровки конвертера и др.; $[C]_{ме}$ - содержание углерода в металле после продувки, %; B - основность шлака, равная отношению $(CaO + MgO)/(SiO_2 + P_2O_5)$.

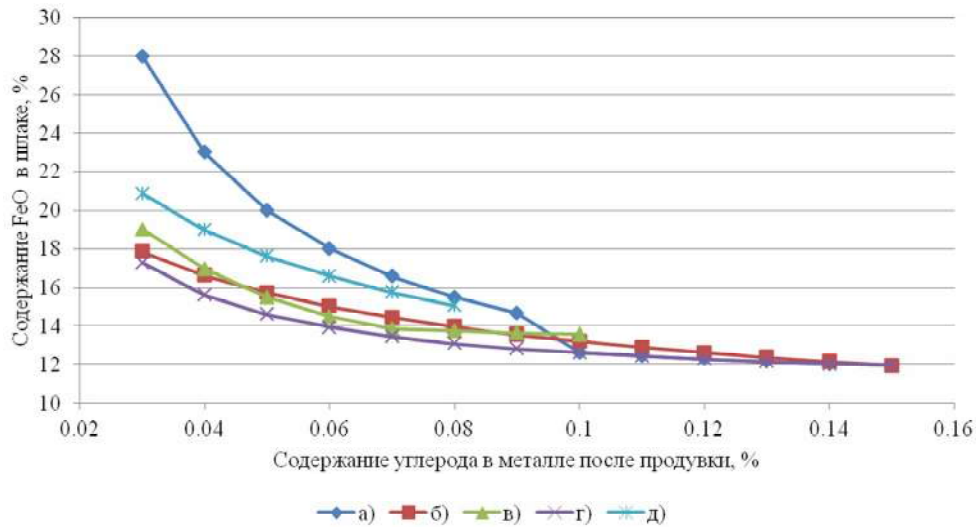


Рис. 2 – Результати расчета содержания (FeO) в шлаке после продувки (при $V = 3,0$) по выражениям, приведенным в: [1, 13] – а); [3] – б); [6] – в); в [7] – г); а также по зависимости (4) при значениях $k_1 = 4,5$ и $n = 3$ (для «холодных» шихтовок плавки) – д)

Получено, что при $[C]_{me} \leq 0,08\%$ для условий «горячей», «нормальной» и «холодной» шихтовки плавки значения коэффициентов k_1 , (n) соответственно равны 4,5 (4,0); 4,9 (4,0) и 4,5 (3,0) (см. рис. 3).

В начале расчета производится пересчет расходов чугуна жидкого, всех МО, ШОМ и УСМ, а также футеровки, шлакового гарнисажа, миксерного шлака, перешедших в плавку, на удельные - m , кг/100 кг металлошихты (МШ).

Масса лома стального углеродистого определяется, как:

$$m_{лом} = 100 - m_{чуг} - \sum_{i=1}^{nMO} m_{MO,i}, \text{ кг/100 кг МШ}, \quad (5)$$

где nMO – количество видов дополнительных МО.

Массы окислившихся элементов (C, Si, Mn, P, S) вычисляются последовательно по выражению, кг/100 кг МШ:

$$\Delta m_{[E]} = (m_{чуг} \cdot [E]_{чуг} + m_{лом} \cdot [E]_{лом} + m_{изв} \cdot [E]_{изв} + m_{фут} \cdot [E]_{фут} + m_{ш.чуг} \cdot [E]_{ш.чуг} + m_{гарн} \cdot [E]_{гарн} + \sum_{i=1}^{nMO} m_{MO,i} \cdot [E]_{MO,i} + \sum_{i=1}^{nШОМ} m_{ШОМ,i} \cdot [E]_{ШОМ,i} + \sum_{i=1}^{nУСМ} m_{УСМ,i} \cdot [E]_{УСМ,i} - m_{см} \cdot [E]_{см}) / 100, \quad (6)$$

где E – содержание химического элемента, % масс.; $nШОМ$, $nУСМ$ - количество видов дополнительных ШОМ и УСМ; индексы обозначают параметры: чуг – жидкого чугуна; лом – лома стального углеродистого; изв – извести; фут – футеровки; ш. чуг – миксерного шлака; гарн – шлакового гарнисажа; см – металла после продувки.

Результирующие массы оксидов, переходящих в шлаковую фазу ($CaO, SiO_2, MgO, P_2O_5, MnO, Al_2O_3, TiO_2, CaF$ и др.) вычисляются последовательно по выражению, кг/100 кг МШ:

$$m_{(E_xO_y)} = (m_{лом} \cdot (E_xO_y)_{лом} + m_{изв} \cdot (E_xO_y)_{изв} + m_{фут} \cdot (E_xO_y)_{фут} + m_{ш.чуг} \cdot (E_xO_y)_{ш.чуг} + m_{гарн} \cdot (E_xO_y)_{гарн} + \sum_{i=1}^{nMO} m_{MO,i} \cdot (E_xO_y)_{MO,i} + \sum_{i=1}^{nШОМ} m_{ШОМ,i} \cdot (E_xO_y)_{ШОМ,i} + \sum_{i=1}^{nУСМ} m_{УСМ,i} \cdot (E_xO_y)_{УСМ,i}) / 100 + \Delta m_{[E]} \cdot \frac{\mu_{E_xO_y}}{x \cdot \mu_E} \quad (7)$$

где μ – молекулярная масса.

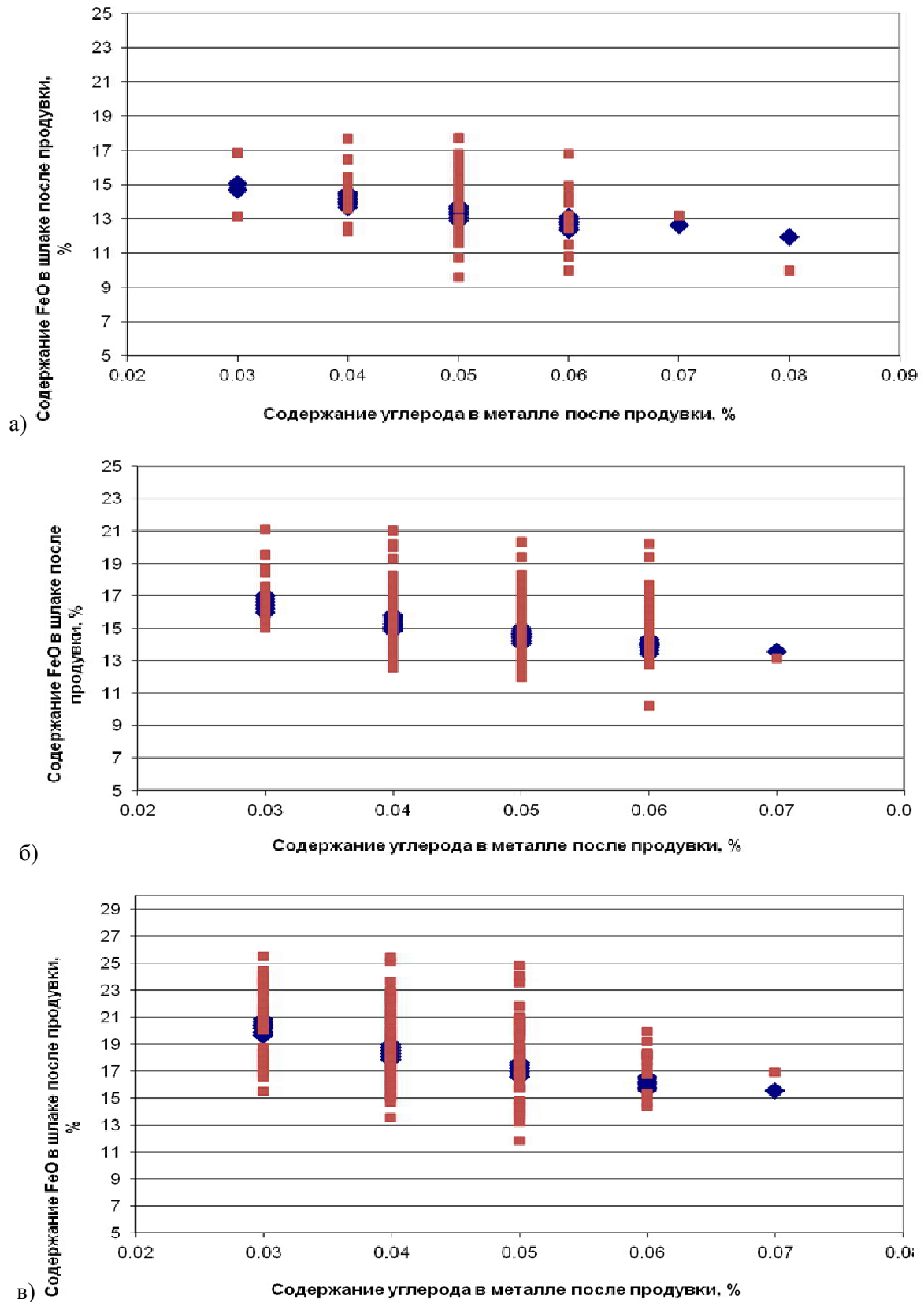


Рис. 3 – Зависимость содержания (FeO) в шлаке от содержания углерода в металле после продувки (декабрь 2012 г.) при «горячей» (а), «нормальной» (б) и «холодной» (в) шихтовках плавки и основности шлака $B = 2,5 - 3,0$ (среднемесячное значение 2,7); красные квадратики – фактические, синие ромбики – расчетные значения

Масса гомогенного шлака, кг/100 кг МШ:

$$m_{\text{шл}} = \frac{m_{\text{CaO}} + m_{\text{SiO}_2} + m_{\text{MgO}} + m_{\text{MnO}} + m_{\text{P}_2\text{O}_5} + m_{\text{Al}_2\text{O}_3} + m_{\text{TiO}_2} + m_{\text{CaF}} + \dots + \Delta m_S \cdot \left(1 - \frac{k_{S,\text{газ}}}{100}\right)}{1 - \frac{(FeO)_{\text{шл}}}{100} - \frac{(Fe_2O_3)_{\text{шл}}}{100}} \quad (8)$$

Массы оксидов железа в шлаке, кг/100 кг МШ:

$$m_{\text{FeO}} = \frac{m_{\text{шл}}(FeO)_{\text{шл}}}{100}; \quad m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{m_{\text{шл}}(Fe_2O_3)_{\text{шл}}}{100} \quad (9)$$

Масса образовавшегося за плавку оксида железа FeO в шлаке равна:

$$\begin{aligned} \Delta m_{\text{FeO}} = & m_{\text{FeO}} - (m_{\text{лом}} \cdot (FeO)_{\text{лом}} + m_{\text{изв}} \cdot (FeO)_{\text{изв}} + m_{\text{фут}} \cdot (FeO)_{\text{фут}} + \\ & + m_{\text{ш.чуг}} \cdot (FeO)_{\text{ш.чуг}} + m_{\text{зарн}} \cdot (FeO)_{\text{зарн}} + \sum_{i=1}^{nMO} m_{MO,i} \cdot (FeO)_{MO,i} + \\ & + \sum_{i=1}^{nШОМ} m_{ШОМ,i} \cdot (FeO)_{ШОМ,i} + \sum_{i=1}^{nУСМ} m_{УСМ,i} \cdot (FeO)_{УСМ,i}) / 100 \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогично (10) определяется и масса образовавшегося за плавку оксида железа Fe₂O₃.

Масса окислившегося железа в шлак, кг/100 кг МШ:

$$\Delta m_{\text{Fe}} = \Delta m_{\text{FeO}} \frac{56}{72} + \Delta m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \frac{112}{160} \quad (11)$$

Масса кислорода на окисление углерода расплава, кг/100 кг МШ:

$$m_C^{O_2} = \Delta m_{[C]} \cdot (1 - Z_{\text{CO}_2}) \cdot \frac{16}{12} + \Delta m_{[C]} \cdot Z_{\text{CO}_2} \cdot \frac{32}{12} \quad (12)$$

Масса кислорода на окисление углерода угля, кг/100 кг МШ

$$m_{\text{Суголь}}^{O_2} = \left(\sum_{i=1}^{nУСМ} m_{УСМ,i} \cdot [C]_{УСМ,i} \cdot \left((1 - k_{\text{CO}_2, \text{уголь}}) \cdot \frac{16}{12} + k_{\text{CO}_2, \text{уголь}} \cdot \frac{32}{12} \right) \right) k_{\text{уголь}} \quad (13)$$

Масса кислорода на окисление железа в шлак, кг/100 кг МШ:

$$m_{\text{Fe}}^{O_2} = \Delta m_{\text{FeO}} \frac{16}{72} + \Delta m_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \frac{48}{160} \quad (14)$$

Масса кислорода на окисление железа в дым $m_{\text{Fe,дым}}^{O_2}$, кг/100 кг МШ, определяется по формуле (3). Массы кислорода на окисление примесей *Si*, *Mn*, *P* вычисляются последовательно по выражению, кг/100 кг МШ:

$$m_E^{O_2} = \Delta m_{[E]} \frac{16 \cdot y}{x \cdot \mu_E} \quad (15)$$

Масса кислорода на окисление серы, удаляемой в газовую фазу, кг/100 кг МШ:

$$m_S^{O_2} = \Delta m_S \cdot \frac{k_{S,\text{газ}}}{100} \cdot \frac{32}{32} \quad (16)$$

Суммарный расход «чистого» кислорода на плавку, кг/100 кг МШ:

$$m_{O_2} = (m_C^{O_2} + m_{\text{Суголь}}^{O_2} + m_{\text{Fe}}^{O_2} + m_{\text{Fe,дым}}^{O_2} + m_{\text{Si}}^{O_2} + m_{\text{Mn}}^{O_2} + m_P^{O_2} + m_S^{O_2} + \dots) / k_{\text{дут}} \quad (17)$$

Расход технического кислорода (дутья) на плавку:

$$\begin{aligned} m_{\text{дутья}} &= m_{O_2} \cdot 100 / k_{O_2, \text{дут}}, \text{ кг/100 кг МШ}; \\ V_{\text{дутья}} &= m_{\text{дутья}} \cdot 10 \cdot G_0 / 1.33, \text{ нм}^3/\text{плавку} \\ \mathcal{G}_{\text{дутья}} &= V_{\text{дутья}} / G_{\text{год}}, \text{ нм}^3/\text{т годного}, \end{aligned} \quad (18)$$

где 1,33 – плотность технического кислорода при нормальных технических условиях (при давлении 1,0133·10⁵ Па и температуре 20 °С, т. е. 293 °К – при условии измерения расхода кислорода в цехе).

Прикладная программа для расчета расхода кислорода на конвертерную плавку (ASAG

2.1) розроблена в середі «Borland Delphi 7». Її виконання на ПК можливо при установленій операційній системі «Windows» будь-якої версії. Об'єм виконуваного файлу – 0,6 МБ. Требуване кількість оперативної пам'яті для роботи програми – 4 МБ. Вся інформація о хімічних складах металлоохладителів, шлакообразуючих і вуглеродсодержащих матеріалів, подаваних в конвертер, футеровки, шлакового гарнісажа і міксерного/доменного шлака, а також настроєчні коефіцієнти зберігаються на жорсткому диску ПК в формі поповнюваної бази даних, що дозволяє скоротити час на підготовку і ввід вихідної інформації. Результати роботи програми можна копіювати або переносити в інші застосунки (наприклад, в Microsoft Word), що полегшує їх використання в документах.

В якості прикладу, в таблиці 1 наведені результати розрахунку всіх складових витратної частини балансу технічного кисню на плавках № 1300060 і № 2300061, які були проведені по черзі на різних конвертерах з використанням і без використання додаткового палива (вугля) відповідно. На малюнку 4 показані результати порівняння розрахункових і фактичних значень необхідного витрату технічного кисню по масивам плавки, взятих по черзі, без суттєвих відхилень від технологічного процесу (при відсутності: проміжочного скидання шлаку, значущих викидів шлакометалічної емульсії і викидів металу з конвертера, додувок). Як випливає з представлених даних, на плавках без використання додаткового вуглеродсодержащего матеріалу – вугля, а також при помірних його витратах (до 1 – 1,5 т/плавку) має місце достатньо хороше співвідношення розрахункових і фактичних значень $V_{\text{дутья}}$. Відносне відхилення становить не більше 2%, що, з урахуванням похибки вимірної системи витрату кисню, а також похибок визначення вихідних даних (масові витрати матеріалів, ступінь забрудненості лома, ступінь шлакуваності скрапа і т. п.), свідчить про адекватність розробленої методики розрахунку витрату технічного кисню. При великих витратах вугля похибка визначення необхідного витрату кисню дутья на плавку зростає до 5% і більше. Фактичні значення $V_{\text{дутья}}$ стабільно менше розрахункових, що, очевидно, пов'язано з погіршенням засвоєння вуглеродсодержащих матеріалів; величина $k_{\text{вугль}}$ є складною функцією від таких параметрів, таких як: фракційний склад, витрата, спосіб віддачі УСМ і т. д.

Таблиця 1

Результати розрахунку балансу і необхідного витрату технічного кисню на плавках № 1300060 і № 2300061

Складові витратної частини балансу технічного кисню	Плавка № 1300060		Плавка № 2300061	
	кг / 100 кг МШ	%	кг / 100 кг МШ	%
На окислення С расплава	4,656	67,01	4,768	73,86
На окислення Si расплава	0,735	10,58	0,723	11,21
На окислення Mn расплава	0,107	1,53	0,098	1,52
На окислення P расплава	0,057	0,82	0,059	0,91
На окислення S в газову фазу	<0,001	<0,01	<0,001	<0,01
На окислення Fe в шлак	0,444	6,40	0,326	5,05
На окислення Fe в дим	0,257	3,70	0,257	3,98
На окислення С палива	0,450	6,48	0,0	0,0
Ітого на окислення	6,914	96,5	6,424	96,5
Незасвоєний ванної кисню	0,208	3,0	0,194	3,0
Приміси кисню дутья	0,0347	0,5	0,0323	0,5
Суммарний витрату технічного кисню (дутья)	6,949	100	6,456	100
Суммарний витрату технічного кисню, нм ³ /плавку	19 348		17 495	
Фактичний витрату технічного кисню, нм ³ /плавку	19 200		17 600	

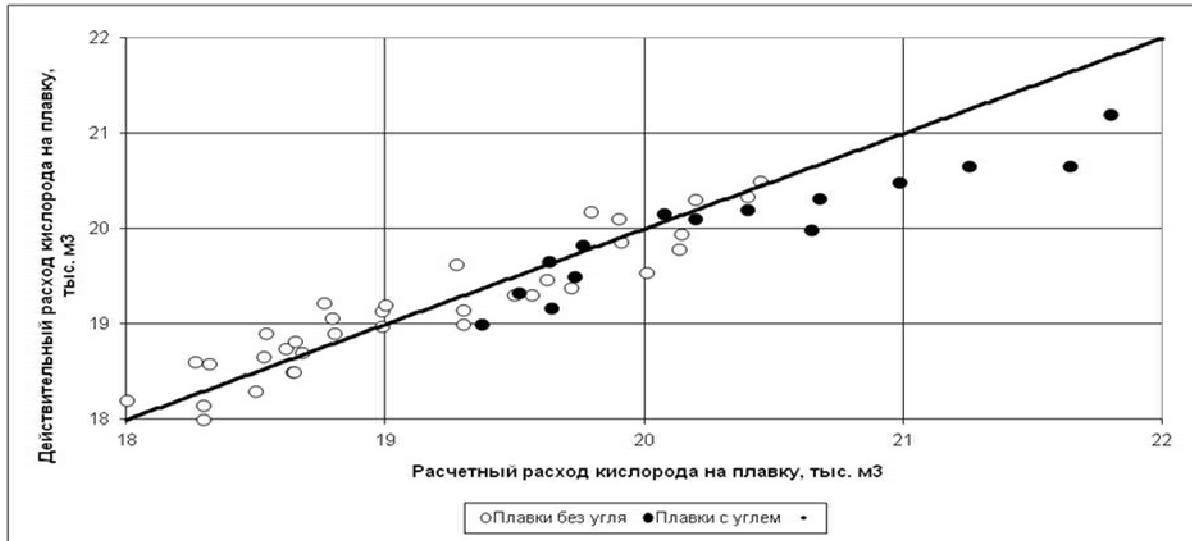


Рис. 4 – Сравнение расчетных и фактических значений расхода технического кислорода на плавках без и с использованием угля (в качестве дополнительного топлива)

Выводы

1. Показано, что используемые до настоящего времени, в том числе в учебных целях, методики расчета необходимого расхода кислорода дутья, а также материального и теплового балансов конвертерной плавки имеют противоречия и неточности, связанные с некорректным учетом влияний: диоксида углерода, содержащегося в недообожженных шлакообразующих материалах, процесса десульфурации металла и перехода серы в газовую фазу, угара железа «в дым» и «в шлак», соотношения CO и CO₂ в газовой фазе, соотношения FeO и Fe₂O₃ в шлаке и др.
2. Разработаны усовершенствованная методика и соответствующая прикладная программа для расчета баланса кислорода конвертерной плавки, которые позволяют учесть одновременно участвующих в плавке до 10 позиций каждого из видов материалов: МО, ШОМ и УСМ, а также поступление в плавку шлакового гарнисажа (и/или торкретпокрытия) на футеровке конвертера, коэффициенты усвоения ШОМ, УСМ и др. При этом уточнен ряд расчетных зависимостей для определения содержания FeO и Fe₂O₃ в шлаке после продувки, расхода кислорода на угар железа «в дым», величины Z_{CO_2} и др.
3. Задачами дальнейших исследований являются: установление зависимостей для расчета коэффициентов усвоения дополнительных углеродсодержащих материалов и разработка технических предложений по повышению эффективности их использования, разработка усовершенствованной методики и прикладной программы для расчета материального и теплового балансов конвертерной плавки.

Список использованных источников:

1. Бигеев А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов / А.М. Бигеев. – М. : Металлургия, 1982. – 160 с.
2. Ойкс Г.Н. Производство стали (расчеты) / Г.Н. Ойкс, Х.М. Иоффе. – М. : Металлургия, 1975. – 480 с.
3. Методичні вказівки до виконання розрахунків киснево-конвертерної плавки для студентів усіх спеціальностей. / Укл.: Б.М. Бойченко, С.В. Бочка. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2001. – 25 с.
4. Старов Р.В. Производство стали в конвертерах / Р.В. Старов, В.А. Нагорских. – К.: Техника, 1987. – 165 с.
5. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С.В. Колпаков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1991. – 464 с.

6. Методичні вказівки до курсової роботи «Матеріальний і тепловий баланс конверторної плавки» (для студентів спеціальності 7.090.401 МЧМ) / А.Х. Димніч [та ін.] – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – 44 с.
7. Методические указания к выполнению курсовой работы «Расчет материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки при переделе обыкновенных чугунов» (для студентов специальности 7.090.401 «Металлургия черных металлов») / Сост.: П.С. Харлашин, В.Я. Бакст. – Мариуполь: ПГТУ, 2005. – 20 с.
8. Якушев А.М. Справочник конвертерщика. – Челябинск: Metallurgiya, 1990. – 448 с.
9. Баптизманский В.И. Конвертерные процессы производства стали / В.И. Баптизманский, М.Я. Меджибожский, В.Б. Охотский. – К.: Вища школа, 1984. – 343 с.
10. Сущенко А.В. О механизме образования высокодисперсной пыли в кислородном конвертере / А.В. Сущенко // Новости науки Приднепровья. – 2008. – № 1-2. – С. 65-68.
11. Туркенич Д.И. Расчет потребности в дутье при различном содержании углерода в конвертерной ванне / Д.И. Туркенич, Е.Г. Молчадский, Ю.А. Романов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1973. – № 1. С. 41-44.
12. Разработка компьютерной модели кислородно-конвертерного процесса / А.С. Седяров [и др.] // Металл и литье Украины. – 2007. – № 5. – С. 18-20.
13. Бигеев А.М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев. – Магнитогорск: МГТУ, 2000. – 544 с.

Bibliography:

1. Bigeev A.M. Mathematic description and calculations of steelmaking processes. – M.: Metallurgy, 1982. – 160 p. (Rus.)
2. Oiks G.N. Steelmaking (calculations) / G.N. Oiks, H.M. Ioffe. – M.: Metallurgy, 1975. – 480 p. (Rus.)
3. Methodic pointing for students of any specialties to making calculations of converter melting./ Compiler.: B.M. Boichenko, S.V. Bochka. – Dnipropetrovsk: NMetAU, 2001. – 25 p. (Ukr.)
4. Starov R.V. Steelmaking in convertors / R.V. Starov, V.A. Nagorskih. – K.: Technika, 1987. – 165 p. (Rus.)
5. Technology of steelmaking in modern converter workshops / S.V. Kolpakov [and others]. – M.: Mashinostroenie, 1991. – 464 p. (Rus.)
6. Methodic pointing for the term paper “Material and thermal balance of converter melting” (for students of speciality 7090401 MBM) / A.H. Dimnich [and others]. – Donetsk 2005. – 44 p. (Ukr.)
7. Methodic pointing for the term paper “Material and thermal balance of oxygen-converter melting for redistribution of usual cast-irons”. / Compiler.: P.S. Harlashin, V.Y. Bakst. – Mariupol: PSTU. – 2005. – 20 p. (Rus.)
8. Yakushev A. M. Reference book of converter steelmaker. – Chelybinsk: Metallurgy, 1990. – 448 p. (Rus.)
9. Baptizmansky V.I. Converter processes of steelmaking / V.I. Baptizmansky, M.Y. Medjibojsky, V.B. Ohotski. – K.: Visha Shkola, 1984. – 343 p. (Rus.)
10. Sushchenko A.V. About mechanism of creation high dispersible dust in oxygen convertor / A.V. Sushchenko // Novosti nauki Pridneproviya. – 2008. – № 1 – 2. – P. 65-68. (Rus.)
11. Turkinich D.I. Calculation of necessities of blowing with different content of carbon in converter bath / D.I. Turkinich, E.G. Molchansky, Y.A. Romanov // Izvestiya VUZov. Chernay Mettalgija. – 1973. – № 1. P. 41-44. (Rus.)
12. Development of computer model of oxygen-converter process / A.S. Sedlyarov [and others] // Metall i litie Ukraini. – 2007. – № 5. – P. 18-20. (Rus.)
13. Bigeev A.M. Metallurgy of steel. Theory and technology of steelmaking / A.M. Bigeev, V.A. Bigeev. – Magnitogorsk: MGTU, 2000. – 544 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 17.01.2013