

УДК 621.385.6:669

© Сущенко А.В.<sup>1</sup>, Фейерэizen И.А.<sup>2</sup>**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА МАТЕРИАЛЬНОГО И ТЕПЛООВОГО БАЛАНСОВ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ**

*Приведены результаты сравнительного анализа методик расчета материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки, используемых в настоящее время на практике и в учебных целях.*

**Ключевые слова:** кислородно-конвертерная плавка, материальный и тепловой балансы, методика расчета, сравнительный анализ.

*Сущенко А.В., Фейерэizen И.О. Порівняльний аналіз методик розрахунку матеріального та теплового балансів киснево-конверторної плавки. Наведені результати порівняльного аналізу методик розрахунку матеріального та теплового балансів киснево-конверторної плавки, що використовуються в даний час на практиці та в учбових цілях.*

**Ключові слова:** киснево-конверторна плавка, матеріальний та тепловий баланси, методика розрахунку, порівняльний аналіз.

*A.V. Sushchenko, I.O. Fieiereizen. Comparative analysis of methods for calculation of material and thermal balances of oxygen-converter melting. The results of comparative analysis of different methods for calculation of material and thermal balances of the oxygen-converter melting currently used in practice and for educational purposes are presented.*

**Keywords:** oxygen-converter melting, material and thermal balances, method for calculation, comparative analysis.

**Постановка проблемы.** Уровень и структура материальных и энергетических затрат на производство конвертерной стали характеризуют состояние технологии и техники процесса. Системный анализ этих затрат позволяет вскрыть резервы и наметить пути их реализации, улучшить технико-экономические показатели выплавки стали. Для этой цели зачастую выполняют подробные расчеты материального и теплового балансов плавки. Кроме того, такие вариативные расчеты позволяют получить дополнительную информацию о взаимосвязи выходных параметров процесса с его начальными параметрами и определить оптимальные значения последних в зависимости от задач производства. Однако, как справедливо отмечают авторы работы [1], используемые в настоящее время методики расчета материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки (МиТБ ККП) устарели и требуют доработки применительно к современным условиям производства.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известные и наиболее используемые в настоящее время методики расчета МиТБ ККП [2-7] базируются на двух основных – А.М. Бигеева [2] и Г.Н. Ойкса, Х.М. Иоффе [7] (при условии заданного [7] - а или определяемого расхода металлолома [7] - б). Для всех методик общими исходными данными являются: химические составы жидкого чугуна, металлолома, металла после продувки, шлакообразующих материалов, футеровки, величина основности шлака, расход плавикового шпата или его заменителя, а также температуры исходных и конечных составляющих плавки. При этом в методиках [5 - 7] не учитывают приход с металлоломом мусора (причем только в [4] помимо SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> учитывают содержание CaO и MgO в нем) и окалины; в [5 - 7] не учитывают приход миксерного шлака в тепловом, а в [7] – и в материальном балансах плавки; в [3] не разделяют потери металла на составляющие; в [6 - 7] не учитывают потери теплоты на разложение оксидов железа шихтовых материалов. Методики [2, 5] позволяют рассчитать расход лома с учетом окатышей, а также дополнительный приход теплоты от дожигания CO до CO<sub>2</sub> в полости конвертера; в [6]

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

<sup>2</sup> аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

учитывают наличие операции факельного торкретирования футеровки перед плавкой.

Расчет МиТБ ККП по методикам [2 - 7] производится в следующей последовательности (см. рис.). На первом этапе задается температура металла в конце продувки и определяются расходы лома и чугуна на плавку. Для этого авторы [2 - 5] и [7] - б составляют предварительный тепловой баланс плавки, в методиках [6] и [7] - а указанными расходами задаются. На втором этапе расчета определяют предварительно расход всех шлакообразующих материалов, расход технического кислорода на плавку, количество образовавшегося шлака и конвертерного газа, выход годного металла. При этом авторы [6] производят уточнение всех рассчитанных параметров (за исключением расхода дутья и выхода конвертерного газа) путем циклического расчета до достижения заданной точности (0,5 %) выхода годного металла. А авторы [3] сравнивают полученное значение основности шлака с принятым в начале расчета: если отклонение не превышает  $\pm 0,25$ , то считают что расчет произведен верно. После этого рассчитывают недостающие параметры: потребность в дутье, выход годного металла, а также количество и состав конвертерного газа. Третий этап включает составление уточненного теплового баланса плавки. Заключительным четвертым этапом является проверка точности расчета и корректировка (при необходимости) соотношения расходов лома и чугуна на плавку. Для этого в методиках [2, 5] на основе теплового баланса уточняют температуру металла в конце продувки. Если она отличается не более чем на  $\pm 10$  °C ( $\pm 5$  °C) от предыдущего значения, считают, что расчет верен, в противном случае корректируют расход лома и чугуна и повторяют расчет. В соответствии с методикой [3] при невязке теплового баланса более 0,5 % (но не более 0,8 %) проводят пересчет и корректировку массы лома, однако перерасчет остальных параметров не производят. При невязке более 0,8 % изменяют исходные данные и повторяют расчет. В методиках [3, 4, 6 - 7] не производят повторный расчет параметров на основе уточненного теплового баланса плавки, т.е. четвертый этап отсутствует.

При составлении теплового баланса (для определения расхода лома  $G_l$ , кг/100 кг металлошихты – МШ) наиболее полно учитывают его приходные и расходные составляющие в методике [2]:

$$G_l = \frac{\left( \sum \Delta H_{\text{чуг}}^{\text{хим}} + 88 \cdot t_{\text{чуг}} + Q_{\text{ш.о.}} + Q_{\sum \text{FeO}}^{\text{обр}} + Q_{\text{CO}}^{\text{дож}} \right) - \left( Q_{\text{м}}^{\text{физ}} + Q_{\text{шл}}^{\text{физ}} + Q_{\text{г}}^{\text{физ}} + Q_{\text{м}}^{\text{хим}} + A \right)}{61,9 + 0,88 \cdot t_{\text{чуг}} + 10^{-2} \cdot \left( \sum \Delta H_{\left( \sum \text{FeO} \right)}^{\text{разл}} + \sum \Delta H_{\text{чуг}}^{\text{хим}} - \sum \Delta H_{\text{л}}^{\text{хим}} \right) - 0,7 \cdot t_{\text{л}}}, \quad (1)$$

где  $\sum \Delta H_{\text{чуг}}^{\text{хим}}$ ,  $\sum \Delta H_{\text{л}}^{\text{хим}}$  – количество теплоты, выделяющегося при полном окислении примесей 100 кг соответственно чугуна и лома, кДж/100 кг МШ;

$Q_{\sum \text{FeO}}^{\text{обр}}$ ,  $Q_{\text{ш.о.}}$  – соответственно теплоты образования оксидов железа и шлакообразования, кДж/100 кг МШ;

$Q_{\text{CO}}^{\text{дож}}$  – теплота дожигания СО до СО<sub>2</sub> в полости конвертера, кДж/100 кг МШ;

$Q_{\text{м}}^{\text{физ}}$ ,  $Q_{\text{шл}}^{\text{физ}}$ ,  $Q_{\text{г}}^{\text{физ}}$  – соответственно физические теплоты металла, конечного шлака и отходящих газов, кДж/100 кг МШ;

$Q_{\text{м}}^{\text{хим}}$  – химическая теплота, которая может выделиться при полном окислении примесей конечного металла, кДж/100 кг МШ;

$\sum \Delta H_{\left( \sum \text{FeO} \right)}^{\text{разл}}$  – теплота, затрачиваемая на полное разложение оксидов железа, содержащихся в 100 кг лома, кДж/100 кг МШ;

$t_{\text{чуг}}$ ,  $t_{\text{л}}$  – соответственно температура заливаемого чугуна и металлолома, °C;

$A$  – постоянный член, равный 6000 - 7000 кДж/100 кг МШ.

При этом автор [2] указывает, что величина коэффициента  $A$  включает в себя «тепловые потери и другие малозначительные статьи теплового баланса: разложение карбонатов, испарение влаги шихты и т. п.». Это является не совсем корректным, т.к. при выводе уравнения (1) в величину  $A$  вошло и слагаемое  $61,9 \cdot 10^2$  из приходной части теплового баланса, т.е. фактическая величина указанных потерь в (1) составляет 12190 – 13190 кДж/100 кг МШ.

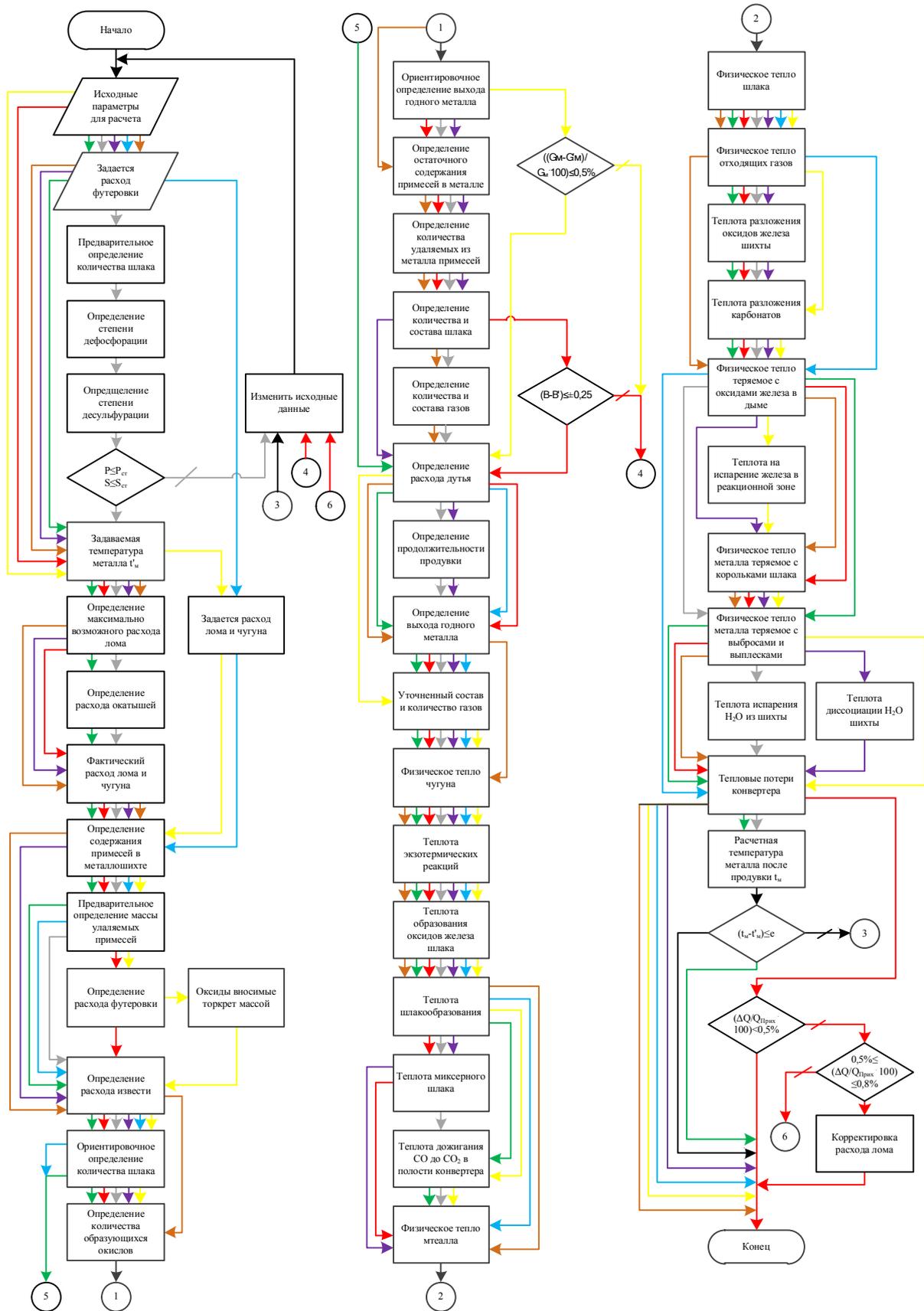


Рисунок – Алгоритм расчета материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки по известным методикам: [2] – серая линия; [3] – красная линия; [4] – фиолетовая линия; [5] – зеленая линия; [6] – желтая линия; [7] - а – голубая линия; [7] - б – оранжевая линия

В методиках [3, 4] уравнение теплового баланса существенно упрощают, учитывая только: теплоту полного окисления примесей чугуна, физические теплоты конечного металла и заливаемого чугуна, а также потери теплоты с неокислившимся углеродом металла. При этом в уравнение входит постоянный член  $A_l$  (с обратным знаком относительно  $A$  в уравнении (1)), значение которого соответствует разнице между суммами «неучтенных» статей приходной и расходной частей теплового баланса: от окисления железа и шлакообразования, на разложение оксидов железа и карбонатов, тепловые потери конвертера, с отходящими газами, конечным шлаком и физическими потерями металла (с выбросами и выносами, с корольками шлака и в виде пыли). Следует также отметить, что в [3] в знаменателе выражения типа (1) не учитывают слагаемое 61,9 из-за малости.

$$G_l = 17,4 + 4,1 \cdot ([C]_q - 4,0) + 9,5 \cdot ([Si]_q - 0,5) + 0,034 \cdot (t_q - 1330) + 3,2 \cdot ([Mn]_q - 0,2) + 11 \cdot (0,2 - [C]_m) + 0,05 \cdot (1650 - t_m) \quad (2)$$

где  $[E]_q$  – содержание соответствующего элемента в жидком чугуне, %;

$[C]_m, t_m$  – содержание углерода в металле после продувки (%) и его температура, °C.

В методике [7] - б расход металлолома обозначают через  $X$  и составляют материальный баланс, из которого получают два уравнения для определения массы шлака и извести, которые решают совместно с уравнением теплового баланса, получая искомое значение  $X$ .

При определении массы футеровки конвертера, перешедшей за плавку в шлак, в [6] рассчитывают среднюю за кампанию скорость износа футеровки (через принятую массу изношенного слоя), а авторы [3] используют эмпирическое уравнение вида  $G_\phi = f(G_q, [C]_m)$ , где  $G_q$  – масса чугуна. В других методиках величиной  $G_\phi$  задаются (в пределах от 0,2 до 1,3 кг/100 кг МШ).

В настоящее время при выплавке стали в конвертерах с переклазоуглеродистой футеровкой, как правило, используют шлакообразующие и другие материалы с высоким содержанием MgO, что существенно влияет на химический состав, основность и массу шлака, а также искомый расход извести  $G_{изв}$ . При этом только в методике [6] учитывают содержание MgO в исходных материалах:

$$G_{изв} = \frac{100 \cdot [B(G_{SiO_2} + G_{SiO_2}^{микс.шл.} + G_{P_2O_5}) - (G_{MgO}^{микс.шл.} + G_{MgO})]}{(\%CaO)_{изв} + (\%MgO)_{изв} - B \cdot (\%SiO_2)_{изв}} \cdot \frac{1}{K_{усв} \cdot (1 - K_{нн})} \quad (3)$$

где  $B$  – основность конечного шлака с учетом MgO и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в нем;

$G_{RO_x}, G_{RO_x}^{микс.шл.}$  – масса соответствующего оксида в конвертерном и миксерном шлаках соответственно, кг;

$(\%RO_x)_{изв}$  – содержание соответствующего оксида в извести, %;

$K_{усв}, K_{нн}$  – коэффициенты, учитывающие усвоение извести шлаком и потери ее массы при прокаливании.

Параметр  $K_{усв}$  используют также в методике [3], принимая его равным 0,9, в других методиках он не учитывается.

При определении расхода технического кислорода на плавку авторы [2, 5] не учитывают его затраты на окисление железа, теряемого с дымом, предполагая, что оно в отходящих газах находится в чистом виде. Авторы [6] не рассматривают затраты кислорода на окисление углерода расплава до его диоксида в ванне, считая что CO<sub>2</sub> образуется только над ней за счет окисления CO неусвоенным кислородом дутья. В методиках [3 - 7] не учитывают дополнительный приход кислорода за счет разложения карбонатов, а в [6 - 7] – за счет разложения оксидов железа шихтовых материалов; в [3 - 6] также не учитывают затраты кислорода на переход части серы металлошихты в газовую фазу (в виде SO<sub>2</sub>).

Одним из ключевых параметров при расчете МлТБ ККП является содержание оксидов железа в шлаке, т.к. оно влияет на массу конечного шлака, выход годного металла, расходы кислорода, извести и других материалов. В [7] его величину принимают постоянной, в [5, 6] – задают с учетом параметра  $[C]_m$ , а в [2, 3, 4] рассчитывают по выражениям соответственно:

$$\left(\sum FeO\right)_{шл} = 12 + \frac{0,9}{[C]_m} \quad (\text{при } [C_m] < 0,05 \text{ \%}); \quad (4)$$

$$(Fe_xO_y) = K_1 \frac{K_2}{\sqrt[4]{[C]_m}} \sqrt[3]{B}; \quad (5)$$

$$\left(\sum FeO\right)_{шл} = 4B + \frac{0,3}{[C]_m} + 10^{-6} \cdot t_m^2 + 1,25, \quad (6)$$

где  $\left(\sum FeO\right)_{шл}$  – общее содержание оксидов железа в шлаке, %;

$K_1, K_2$  – коэффициенты учитывающие тип продувки (при кислородном дутье сверху  $K_1 = 1$ ) и вид оксида (для FeO  $K_2 = 5,15$ , а для Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  $K_2 = 2,34$ ).

При расчете выхода жидкого металла составляется подробный баланс железа. При этом авторы [6 - 7] не учитывают приход железа, восстановленного из его оксидов, содержащихся в шихтовых материалах, а в [5] – потери металла с корольками в шлаке. Количество железа, теряемого с конвертерными газами, задается на основе экспериментальных данных по средним значениям запыленности отходящих газов и содержанию железа в пыли (без учета особенностей шихтовки, дутьевого, шлакового и температурного режимов плавки).

Определяя массу и объем отходящих газов, авторы [2, 5] пренебрегают неусвоенным кислородом дутья, а в [5] – также и содержанием N<sub>2</sub> в них. Авторы [3, 5, 6] не учитывают наличие влаги в шлакообразующих материалах и, соответственно, переход ее в отходящие газы. Только в методике [4] рассчитывается процесс диссоциации водяного пара и образование газообразного водорода, в [2], [7] учитывают приход SO<sub>2</sub> в газовую фазу.

При расчете физической теплоты жидких: чугуна, металла и шлака в методиках [4, 6 - 7] используют удельные теплоты фазовых превращений, а в [2, 3, 5] – они косвенно учитываются в зависимостях энтальпий соответствующих веществ от температуры.

При расчете теплоты экзотермических реакций в [2, 5] не учитывают окисление железа «в дым», а в [2 - 6] – окисление S с образованием SO<sub>2</sub>.

При расчете теплоты шлакообразования в методике [2] учитывают теплоту образования сложных веществ при взаимодействии оксида кальция с диоксидом кремния (2(CaO) · (SiO<sub>2</sub>)) и с пентаоксидом фосфора (3(CaO) · (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) или 4(CaO) · (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)), а также теплоту образования алюминатов и ферритов кальция (m(CaO) · n(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и m(CaO) · n(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)). Причем, последнюю определяют не через «остаток», а по общему содержанию (CaO) в шлаке, что является некорректным. В [3, 4, 6 - 7] не учитывают теплоту образования алюминатов и ферритов, а в [5] – теплоту образования три(тетра)фосфата кальция.

Температура отходящих газов  $T_{oz}$  в процессе продувки плавки изменяется сложным образом, в зависимости от шихтовых условий и хода процесса. Авторы [5, 7] величиной  $T_{oz}$  задаются: [5] из диапазона 1900 - 2100 °С, а в [7] – 1450 °С. В остальных методиках ее принимают средней между температурами заливаемого чугуна и металла после продувки.

«Тепловые потери конвертера» в процессе плавки включают в себя: потери через футеровку стен и днища, излучением через горловину и на охлаждение фурмы. При этом потери теплоты через футеровку складываются из потерь на аккумуляцию ее активным тепловым слоем и от кожуха агрегата в окружающую среду. Потери излучением через горловину включают потери от разогретой футеровки во время межплавочного простоя и от ванны во время продувки. Для квазистационарных условий работы футеровки агрегата можно принять, что количество теплоты, затраченное на аккумуляцию футеровкой в процессе плавки примерно равно количеству теплоты, отданной излучением от внутренней поверхности футеровки в период простоя (учитывая, что запыленные конвертерные газы имеют степень черноты близкую к 1, потерями теплоты от ванны в процессе продувки можно пренебречь). В работах [2 - 5] и [7] - б величиной тепловых потерь конвертера задаются (в диапазоне от 1,5 до 5 % от суммарного прихода теплоты). Авторы [6] и [7] - а, потери теплоты через футеровку в окружающую среду определяют с использованием известных уравнений теплоотдачи для вынужденной и естественной конвекции и теплопередачи через многослойную стенку. При этом в [6] не определяют потери теплоты излучением через горловину конвертера. Потери теплоты на охлаждение фурмы рассчитывают через расход и перепад температуры охлаждающей воды [6] или приняв величину

плотности теплового потока на фурму [7] - а.

В соответствии с методиками [3 - 7] при расчете теплового баланса не учитывают: потери теплоты на испарение влаги из шихтовых материалов, в [2, 3, 5 - 7] – на ее диссоциацию, в [7] – на разложение карбонатов шлакообразующих материалов (извести), в [2, 5] - потери теплоты с корольками шлака, в [6] – с выбросами и выносами из конвертера, в [2 – 5] и [7] – затраты теплоты на испарение оксидов железа в реакционной зоне.

**Цель статьи** – выполнить сравнительный анализ известных методик расчета материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки, используемых в настоящее время в практических и учебных целях, и оценить влияние принятых в них допущений и применяемых алгоритмов расчета на точность определения искомых параметров процесса.

**Изложение основного материала.** Для проведения сравнительного анализа результатов расчета МиТБ ККП, выполненных по указанным выше методикам, использовали промышленные данные по 10 плавкам, проведенным на 350-т кислородном конвертере без применения угля, магнезиальных флюсов, додувок и промежуточного скачивания шлака (т.е. в условиях применимости анализируемых методик расчета). В таблице 1, в качестве примера, приведены параметры одной из характерных плавков, в таблице 2 – химический состав используемых материалов (приведенный осредненный состав металлолома пересчитывался с учетом составов и масс всех видов металлоохлаждателей). Масса перешедшей в плавку периклазоуглеродистой футеровки конвертера была определена по средней (за кампанию) скорости ее износа и принята для всех методик одинаковой. Значения остальных эмпирических параметров (коэффициенты усвоения извести, кислорода, доля корольков в шлаке и т.п.) вначале принимались равные средним значениям из соответствующих диапазонов, рекомендуемых каждой методикой в отдельности, а затем уточнялись.

Таблица 1

Показатели сравнительной конвертерной плавки

Параметр, ед. измерения	Величина	Параметр, ед. измерения	Величина
1. Расход металлоохлаждателей, т	91	Mn, %	0,06
в т.ч. лом – обрешь усредненная, т	24,3	S, %	0,03
лом стальной углеродистый, т	57,5	P, %	0,006
скрап зашлакованный, т	7,6	температура, °C	1649
чугун чушковый, т	1,6	4. Шлак после продувки:	
2. Параметры жидкого чугуна:		CaO, %	39,24
расход, т	289,28	MgO, %	8,62
Si, %	0,92	FeO, %	16,7
Mn, %	0,24	SiO <sub>2</sub> , %	15,06
S, %	0,01	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	0,8
P, %	0,065	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	1,07
температура, °C	1301	основность	2,61
3. Металл после продувки:		5. Расход извести на плавку, т	22,75
масса жидкого металла, т	345	6. Расход O <sub>2</sub> на плавку, тыс. м <sup>3</sup>	19,3
C, %	0,05	7. Длительность продувки, мин	19

Результаты расчета МиТБ ККП (все статьи выражены в кг/100 кг МШ и МДж/100 кг МШ соответственно), полученные на ПК, с использованием методик [2 - 7] приведены в таблицах 3 и 4. При этом в верхнем ряду указаны полученные в первом приближении показатели при использовании средних значений эмпирических параметров. В расчетах по [2 - 5] и [7] - а невязка материального баланса колеблется в пределах от 0,25 до 1,14 кг/100 кг МШ (0,22 – 1,01 %), а по [6] и [7] - б – от 0,005 до 0,023 кг/100 кг МШ, что меньше 0,2 % и удовлетворяет рекомендуемым пределам. Расхождения теплового баланса более существенны, так для методик [3 - 6] и [7] - а оно находится в диапазоне от 0,170 до 9,252 МДж/100 кг МШ (0,09 – 5,10 %); при этом значения расчетной температуры в [2, 5] составили 1705 и 1675 °C, что превышает фактическую (принятую в начале расчета) на 56 и 26 °C соответственно.

Для достижения требуемой точности расчета авторы методик [2 – 5] рекомендуют изме-

нять расход металлоохлаждителей (окатышей или лома) на плавку и повторяют расчет (выполняют итерационный цикл). В [6] отсутствуют рекомендации по уменьшению величины невязки теплового баланса, а в [7] значения эмпирических параметров заданы точно (не диапазоном), вследствие чего уточнение расчетов по этим методикам не проводили. Корректировку расхода металлолома при расчете по [2, 5] производили из условия, что 1 кг лома/100 кг МШ снижает температуру металла на 15 – 20 °С [5]. При расчете по методикам [3, 4] при невязке теплового баланса более 0,5 – 0,8 % расчет корректирующих добавок металлолома производили на основе его охлаждающего эффекта [3]. Результаты расчетов МиТБ ККП при условии достижения заданного уровня невязки теплового баланса приведены в таблицах 3 и 4 во втором (среднем) ряду. Требуемый результат достигается при выполнении 5 – 7 итерационных циклов, что затруднительно без разработки специального программного обеспечения. При этом значения указанных выше эмпирических параметров были оставлены без изменений. Следует отметить, что в методиках [3 – 5] расходы жидкого чугуна и лома приблизились к фактическим значениям, а в [2] – наблюдается обратная тенденция. Расхождение материального баланса осталось на том же уровне, а в [4] увеличилось на 0,1 % по сравнению с предыдущим расчетом (первого приближения).

Таблица 2

Химический состав используемых материалов

Материал	Содержание, %														
	Fe	C	Si	Mn	P	S	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MnO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O
Обрезь усреднен.	99,5	0,1	0	0,4	0	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Лом стальной угл.	94,9	0,2	0,1	0,5	0	0,04	0,6	1,4	2,3	0	0	0	0	0	0
Чугун чушковый	94,7	4,3	0,7	0,2	0,07	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Скrap зашлаков.	79,8	0,2	0,1	0,1	0	0,03	3,1	0	3,8	0,5	9,3	1,8	0,5	0,1	0,5
Известь 2,5 % ППП	-	-	-	-	-	0,05	-	-	1,8	0	97	0	1,05	0,1	0
Шлак миксерный	-	-	-	-	-	0,1	16,8	9	32	19,5	10	3,5	9	0,1	-
Периклазоуглеродистая футеровка	-	8	-	-	-	-	-	0,4	-	-	1,5	-	90,1	-	-

На третьем этапе расчета за счет изменения эмпирических параметров (в рамках указанных в [2 - 5] диапазонов): расход миксерного шлака ( $g_{м.ш.}$ ), содержание мусора ( $\varphi_{м.л.}$ ), оксидов железа в металлоломе ( $\varphi_{о.л.}$ ), кислорода в дутье ( $\varphi_{O_2}$ ) и коэффициент его усвоения ( $n_d$ ) стремились достичь необходимого уровня невязки материального баланса. Окончательные значения параметров  $g_{м.ш.}$ ,  $\varphi_{м.л.}$ ,  $\varphi_{о.л.}$ ,  $\varphi_{O_2}$  и  $n_d$  соответственно составили: для [2] – 0,6 % от массы жидкого чугуна, 1,0 %, 1,0 % от массы лома, 99,5 % и 95 % (при рекомендованных 0,6 – 1,7 %, 1 – 3 %, 1 – 4 %, 99,5 % и 90 – 100 %); для [3] – 0,5 %, 0,5 %, 1 %, 98,35 % и 98 % (0,5 – 1,8 %, 0,5 – 2,0 %, 1,0 – 1,5 %, 97 – 99,7 % и 93 – 98 %); для [4] – 0,6 %, 0,65 %, 1,2 %, 99,5 % и 97 % (0,6 – 0,9 %, 0,65 %, 1,2 %, 99,5 % и 97 %); для [5] –  $g_{м.ш.} = 0,2$  %,  $\varphi_{O_2} = 99,5$  % и  $n_d = 95$  % (0,2 – 1,0 %, 99,5 % и 90 – 95 %). Следует отметить, что в итерационном процессе физические потери металла не участвовали в адаптации расчетной модели, в виду того, что их изменение практически полностью компенсировалось изменением выхода годного металла и массы шлака. Значения эмпирических параметров выбирались таким образом, чтобы расчетные значения расходов были близкими к фактическим. В соответствии с методикой [3] одним из условий правильности расчета материального баланса является получение абсолютной погрешности определения величины основности шлака не более  $\pm 0,25$ , однако это условие не было достигнуто. Следует отметить, что на практике коэффициенты  $g_{м.ш.}$ ,  $\varphi_{м.л.}$  и  $\varphi_{о.л.}$  являются заданными входными данными, которые зависят от способа подготовки металлошхты, ее вида и качества, поэтому изменение значений данных параметров является некорректным. Результаты расчета (с минимально возможной невязкой материального и требуемым уровнем точности по тепловому балансам) приведены в таблицах 3 и 4 в третьем (нижнем) ряду; по ним проводился дальнейший анализ.

Таблица 3

Материальный баланс плавки, кг/100 кг МШ

Методика		Статья	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7] - а	[7] - б
Приходная часть	Жидкий чугун	<u>76.119</u>	<u>80.091</u>	<u>80.031</u>	<u>76.538</u>	76,070	76,070	75,000	
		<u>72.919</u>	<u>78.589</u>	<u>74.918</u>	<u>75.081</u>				
		72,919	78,589	74,918	75,081				
	Лом, в т. ч. :	<u>23.881</u>	<u>19.909</u>	<u>19.969</u>	<u>23.462</u>	23,930	23,930	25,000	
		<u>27.081</u>	<u>21.411</u>	<u>25.082</u>	<u>24.919</u>				
		27,081	21,411	25,082	24,919				
	- мусор лома	<u>0.478</u>	<u>0.249</u>	<u>0.130</u>	-	-	-	-	
		<u>0.542</u>	<u>0.268</u>	<u>0.163</u>	-				
		0,271	0,107	0,163	-				
	- окалина лома	<u>0.597</u>	<u>0.249</u>	<u>0.240</u>	-	-	-	-	
<u>0.677</u>		<u>0.268</u>	<u>0.301</u>	-					
0,271		0,214	0,301	-					
Фугеровка	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	0,050	0,050	0,05		
	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>	<u>0.050</u>					
	0,050	0,050	0,050	0,050					
Известь	<u>6.573</u>	<u>6.632*</u>	<u>5.446</u>	<u>4.915</u>	6,954*	4,517	5,179		
	<u>6.545</u>	<u>6.576*</u>	<u>5.224</u>	<u>4.835</u>					
	5,678	5,753*	5,133	4,590					
Миксерный шлак	<u>0.850</u>	<u>0.921</u>	<u>0.600</u>	<u>0.459</u>	0,300	-	-		
	<u>0.850</u>	<u>0.904</u>	<u>0.562</u>	<u>0.450</u>					
	0,500	0,393	0,450	0,150					
Технический кислород	<u>6.787**</u>	<u>7.261</u>	<u>7.476</u>	<u>7.048**</u>	6,505	7,274	7,481		
	<u>6.530**</u>	<u>7.135</u>	<u>7.055</u>	<u>6.929**</u>					
	6,532**	6,866	6,913	6,888**					
Итого	<u>114.260</u>	<u>114.865</u>	<u>113.573</u>	<u>112.472</u>	113,810	111,841	112,710		
	<u>113.975</u>	<u>114.665</u>	<u>112.891</u>	<u>112.264</u>					
	112,760	113,062	112,545	111,678					
Расходная часть	Жидкий металл	<u>88.460</u>	<u>89.012</u>	<u>91.522</u>	<u>89.861</u>	92,223	91,269	90,619	
		<u>88.548</u>	<u>89.090</u>	<u>91.893</u>	<u>89.997</u>				
		89,712	89,998	91,922	90,437				
	Шлак	<u>13.610</u>	<u>12.117</u>	<u>9.955</u>	<u>10.844</u>	11,774	9,034	9,939	
		<u>13.589</u>	<u>12.023</u>	<u>9.581</u>	<u>10.683</u>				
		11,632	10,298	9,362	9,984				
	Физические потери металла, в т.ч.:	<u>2.867</u>	<u>3.400</u>	<u>3.312</u>	<u>2.370</u>	1,601	3,643	3,643	
		<u>2.849</u>	<u>3.400</u>	<u>3.282</u>	<u>2.355</u>				
		2,790	3,400	3,265	2,354				
	- корольки в шлаке	<u>0.408</u>	-	<u>0.796</u>	-	0,471	0,500	0,500	
<u>0.408</u>		-	<u>0.766</u>	-					
0,349		-	0,749	-					
- выбросы и выносы из конвертера	<u>2.000</u>	-	<u>0.800</u>	<u>1.500</u>	0,630	1,000	1,000		
	<u>2.000</u>	-	<u>0.800</u>	<u>1.500</u>					
	2,000	-	0,800	1,500					
- пыль	<u>0.459</u>	-	<u>1.716</u>	<u>0.870</u>	0,500	2,143	2,143		
	<u>0.441</u>	-	<u>1.716</u>	<u>0.855</u>					
	0,441	-	1,176	0,854					
Отходящие газы	<u>8.241</u>	<u>9.192</u>	<u>9.037</u>	<u>8.258</u>	8,188	8,600	8,504		
	<u>7.918</u>	<u>9.032</u>	<u>8.494</u>	<u>8.110</u>					
	7,906	8,991	8,346	8,792					
Итого	<u>113.180</u>	<u>113.722</u>	<u>113.826</u>	<u>111.685</u>	113,786	112,546	112,705		
	<u>112.906</u>	<u>113.545</u>	<u>113.250</u>	<u>111.492</u>					
	112,035	112,471	112,895	111,224					
Невязка	кг/100 кг МШ	<u>-1.080</u>	<u>-1.143</u>	<u>0.253</u>	<u>-0.786</u>	-0,023	0,705	0,005	
		<u>-1.069</u>	<u>-1.119</u>	<u>0.359</u>	<u>-0.773</u>				
		-0,724	-0,591	0,350	-0,455				
%	%	<u>-0.95</u>	<u>-1.005</u>	<u>0.220</u>	<u>-0.700</u>	-0,020	-0,630	0,004	
		<u>-0.947</u>	<u>-0.986</u>	<u>0.320</u>	<u>-0.690</u>				
		-0,647	-0,525	0,310	-0,410				

Примечания: \* при коэффициенте усвоения извести  $K_{усв}$  равном 0,9; \*\* при отсутствии организации дополнительного дожигания CO до CO<sub>2</sub> над ванной.

Таблица 4

Тепловой баланс плавки (МДж/100 кг МШ)

Методика		Статья	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7] - а	[7] - б	Откл.*
Приходная часть	Физическая теплота чугуна	<u>91.859</u> <u>87.998</u> <u>87.997</u>	<u>96.653</u> <u>94.840</u> <u>94.840</u>	<u>98.184</u> <u>91.911</u> <u>91.911</u>	<u>92.365</u> <u>90.606</u> <u>90.606</u>	91,360	91,024	89,813	<i>6,84 (3,23)</i>	
	Физическая теплота миксерного шлака	<u>1.121</u> <u>1.121</u> <u>0,659</u>	<u>1.179</u> <u>1.157</u> <u>0,503</u>	<u>0.990</u> <u>0.927</u> <u>0,742</u>	-	-	-	-	<i>0,74 (0,35)</i>	
	Теплота окисления примесей	<u>70.724</u> <u>68.110</u> <u>68,098</u>	<u>71.399</u> <u>70.219</u> <u>70,170</u>	<u>69.071</u> <u>65.163</u> <u>65,156</u>	<u>71.338</u> <u>70.157</u> <u>70,157</u>	71,953	67,709	66,951	<i>6,37 (3,00)</i>	
	Теплота окисления железа	<u>17.279</u> <u>17.247</u> <u>14,764</u>	<u>11.342</u> <u>11.254</u> <u>9,640</u>	<u>17.399</u> <u>17.077</u> <u>16,890</u>	<u>15.201</u> <u>14.976</u> <u>13,995</u>	14,016	18,703	23,555	<i>13,92 (6,56)</i>	
	Теплота шлакообразования	<u>7.854</u> <u>7.814</u> <u>6,791</u>	<u>5.635</u> <u>5.585</u> <u>4,904</u>	<u>5.160</u> <u>4.952</u> <u>4,862</u>	<u>5.586</u> <u>5.496</u> <u>5,184</u>	3,003	4,185	4,142	<i>3,75 (1,77)</i>	
	Итого	<u>188.84</u> <u>182.29</u> <u>178,31</u>	<u>186.21</u> <u>183.06</u> <u>180,06</u>	<u>190.80</u> <u>180.03</u> <u>179,56</u>	<u>184.49</u> <u>181.24</u> <u>179,94</u>	180,33	181,62	184,46	<i>6,15 (2,90)</i>	
Расходная часть	Физическая теплота металла	<u>131.52</u> <u>127.16</u> <u>129,44</u>	<u>128.17</u> <u>128.29</u> <u>129,59</u>	<u>133.20</u> <u>133.74</u> <u>133,78</u>	<u>129.40</u> <u>129.59</u> <u>130,23</u>	133,33	134,12	131,11	<i>5,99 (2,83)</i>	
	Физическая теплота шлака	<u>29.734</u> <u>27.961</u> <u>24,133</u>	<u>25.039</u> <u>24.844</u> <u>21,280</u>	<u>21.961</u> <u>21.136</u> <u>20,654</u>	<u>22.420</u> <u>22.087</u> <u>20,641</u>	26,556	20,479	22,546	<i>6,17 (2,91)</i>	
	Теплота конвертерных газов	<u>14.229</u> <u>13.671</u> <u>13,650</u>	<u>15.901</u> <u>15.624</u> <u>15,210</u>	<u>15.620</u> <u>14.682</u> <u>14,448</u>	<u>19.984</u> <u>19.625</u> <u>19,610</u>	14,135	14,828	14,424	<i>5,96 (2,81)</i>	
	Теплота разложения Fe <sub>x</sub> O <sub>y</sub>	<u>3.665</u> <u>4.034</u> <u>1,822</u>	<u>1.716</u> <u>1.793</u> <u>1,235</u>	<u>1.606</u> <u>1.831</u> <u>1,722</u>	<u>0.505</u> <u>0.496</u> <u>0,166</u>	-	-	-	<i>1,82 (0,86)</i>	
	Теплота разложения CaCO <sub>3</sub>	<u>0.664</u> <u>0.661</u> <u>0,573</u>	<u>0.670</u> <u>0.664</u> <u>0,581</u>	<u>0.548</u> <u>0.526</u> <u>0,516</u>	<u>0.496</u> <u>0.488</u> <u>0,463</u>	0,310	-	-	<i>0,58 (0,27)</i>	
	Теплота, теряемая с пылью	<u>0.478</u> <u>0.459</u> <u>0,459</u>	<u>0.989</u> <u>0.989</u> <u>0,989</u>	<u>2.227</u> <u>2.227</u> <u>2,227</u>	<u>1.510</u> <u>1.483</u> <u>1,482</u>	0,811	2,893	4,276	<i>3,82 (1,80)</i>	
	Теплота, теряемая с корольками в шлаке	-	<u>6.250</u> <u>6,250</u>	<u>1.103</u> <u>1.062</u> <u>1,037</u>	-	0,648	-	0,723	<i>1,04 (0,49)</i>	
	Теплота, теряемая с выбросами и выносами	<u>2.880</u> <u>2.880</u> <u>2,880</u>	<u>6.250</u> <u>6,250</u>	<u>0.991</u> <u>0.991</u> <u>0,991</u>	<u>2.147</u> <u>2.147</u> <u>2,147</u>	-	-	1,447	<i>2,88 (1,36)</i>	
	Теплота на испарение оксидов железа	-	-	-	-	1,597	-	-	<i>1,60 (0,75)</i>	
	Тепловые потери конвертера	<u>5.665</u> <u>5.469</u> <u>5,349</u>	<u>5.307</u> <u>5.217</u> <u>5,132</u>	<u>4.293</u> <u>4.051</u> <u>4,040</u>	<u>5.535</u> <u>5.437</u> <u>5,398</u>	6,407	4,263	9,223	<i>5,18 (2,44)</i>	
	- через футеровку	-	-	-	-	4,336	1,485	-	<i>2,85 (1,34)</i>	
	- на охлаждение фурмы	-	-	-	-	2,071	0,3	-	<i>1,77 (0,84)</i>	
	- излуч. через горловину	-	-	-	-	-	2,478	-	<i>2,48 (1,17)</i>	
	Итого	<u>188.84</u> <u>182.29</u> <u>178,31</u>	<u>184.05</u> <u>183.67</u> <u>180,27</u>	<u>181.55</u> <u>180.25</u> <u>179,42</u>	<u>181.99</u> <u>181.36</u> <u>180,13</u>	183,79	176,58	183,75	<i>7,30 (3,44)</i>	
	Невязка	МДж/100 кг МШ	<u>-0.001</u> <u>-0.001</u> <u>-0,001</u>	<u>-2.162</u> <u>-0.613</u> <u>0,214</u>	<u>-9.252</u> <u>0.216</u> <u>0,140</u>	<u>-2.498</u> <u>0.121</u> <u>0,192</u>	3,463	-5,042	-0,170	-
<u>-5 · 10<sup>-4</sup></u> <u>-5 · 10<sup>-4</sup></u> <u>-5 · 10<sup>-4</sup></u>			<u>-1.175</u> <u>-0.334</u> <u>0,119</u>	<u>-5.100</u> <u>0.120</u> <u>0,080</u>	<u>-1.373</u> <u>0.067</u> <u>0,106</u>	1,884	-2,855	-0,09	-	

Примечание: \* значения максимального отклонения приведены для окончательных расчетов в МДж/100 кг МШ (кг жидкого чугуна с заданными параметрами (табл. 1) /100 кг МШ).

Наиболее близкие результаты расчета к данным сравнительной плавки по расходу лома (жидкого чугуна) получены с использованием методик [5] и [7] - б – 24,919 (75,081) кг/100 кг МШ и 25,000 (75,000) кг/100 кг МШ. При этом, как указывалось выше, в методиках [6] и [7] - а расходами лома и чугуна задаются до начала расчета (поэтому их значения были взяты по данным сравнительной плавки).

При расчете расхода извести удовлетворительная степень точности (с отклонением не более 5 %) была получена при использовании методик [3] ( $K_{усв} = 0,90$ ) и [2].

Фактический расход кислорода составил 7,26 кг/100 кг МШ, а его расчетные значения по [2 - 7] изменяются от 6,47 до 7,48 кг/100 кг МШ, что довольно существенно (14 % от фактического расхода или ~ 2700 м<sup>3</sup> за плавку). Для анализа причин указанных отклонений был составлен подробный баланс кислорода (табл. 5).

Таблица 5

Баланс технического кислорода плавки, кг/100 кг МШ

Методика	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7] - а	[7] - б
Окисление примесей металлошихты:							
C → CO	4,616	4,061	3,880	3,884	4,375	3,940	3,887
C → CO <sub>2</sub>		0,902	0,862	0,863	-	0,876	0,864
Si → (SiO <sub>2</sub> )	0,801	0,855	0,821	0,823	0,832	0,834	0,822
Mn → (MnO)	0,063	0,065	0,058	0,074	0,068	0,068	0,069
P → (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,064	0,061	0,058	0,068	0,067	0,067	0,067
S → SO <sub>2</sub>	0,001	-	-	-	-	0	0
Итого	5,545	5,944	5,680	5,713	5,342	5,785	5,709
Окисление железа:							
Fe → (FeO)	0,516	0,343	0,364	0,555	0,406	0,335	0,370
Fe → (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,349	0,210	0,272	0,270	0,203	0,332	0,365
Fe → Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> дым	-	0,407	0,514	-	0,214	0,429	0,643
Итого	0,865	0,960	1,151	0,825	0,823	1,096	1,378
Всего необходимо кислорода	6,410	6,905	6,831	6,538	6,165	6,881	7,087
Кислород, внесенный шихтой	0,234	0,196	0,152	0,010	-	0	0
Неусвоенный кислород дутья	0,325	0,137	0,172	0,326	0,308*	0,361	0,356
Азот дутья	0,031	0,020	0,035	0,034	0,032	0,032	0,038
Расход технического кислорода	6,532	6,866	6,913	6,888	6,505	7,274	7,481

Примечание: \* полностью расходуется на окисление CO до CO<sub>2</sub> над ванной.

Максимальное отклонение имеет статья расхода кислорода на окисление примесей чугуна (0,60 кг/100 кг МШ, т.е. 8,3 % от фактического), главным образом углерода расплава, что объясняется пренебрежением (в ряде методик), образования CO<sub>2</sub> в ванне, а также различными удельным расходом жидкого чугуна и выходом годного металла. По статье расхода кислорода на окисление железа (в шлак и «в дым») максимальное отклонение составило 0,56 кг/100 кг МШ (~7,6 %), что связано в основном с принятой схемой пылеобразования.

Расчетная масса шлака по указанным методикам составила 9,03 ÷ 11,77 кг/100 кг МШ; большой разбег значений объясняется, прежде всего, изменением расхода извести (от 4,52 до 6,95 кг/100 кг), отсутствием учета прихода в плавку мусора с металлоломом и миксерного шлака, а также различным содержанием оксидов железа в шлаке.

Отклонения расчетных значений выхода годного металла от фактического составили ± (1,0 ÷ 1,5) кг/100 кг МШ (%), что связано с принятыми допущениями по учету корольков в шлаке и прихода оксидов железа с окалиной металлолома, различными значениями содержания оксидов железа в шлаке и физических потерь металла (1,6 - 3,4 кг/100 кг МШ).

Масса отходящих газов во всех методиках определяется достаточно точно, а более высоко-

кий выход конвертерного газа в [3] объясняется повышенным (по отношению к другим методикам) расходом чугуна на плавку.

По статье «Физическая теплота чугуна» в приходной части теплового баланса максимальное отклонение составило 3,23 кг жидкого чугуна/100 кг МШ (далее по тексту - кг чугуна), что связано с большим отличием полученных значений удельного расхода жидкого чугуна, а также различием его теплофизических свойств, принятых в методиках.

По результатам расчета теплоты окисления железа (в шлак и «в дым») и примесей МШ максимальные отклонения значений составили соответственно 6,56 и 3,00 кг чугуна, что связано в основном с принятой схемой пылеобразования, содержанием оксидов железа в шлаке, массой удаляемых примесей МШ, в частности углерода. Следует отметить также и влияние отличия принятых значений тепловых эффектов экзотермических реакций (см. табл. 6).

Таблица 6

Тепловые эффект экзотермических реакций, кДж/кг

Реакция окисления	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
$C \rightarrow CO_2$	-	35300	34068	-	-	33094
$CO \rightarrow CO_2$	10100	-	-	10100	21000	-
$C \rightarrow CO$	-	11680	10459	-	10467	10467
$C \rightarrow CO (CO_2) *$	14770	-	-	14770	-	-
$Si \rightarrow SiO_2$	26970	26930	31071	26970	31102	31102
$Mn \rightarrow MnO$	7000	7035	7360	7000	7366	7366
$P \rightarrow P_2O_5$	21730	19755	24987	21730	25006	25006
$S \rightarrow SO_2$	-	-	-	-	-	9278
$Fe \rightarrow Fe_2O_3$	5278	5110	7360	5278	7366	7366
$Fe \rightarrow FeO$	3707	3600	4815	3707	4820	4819

Примечание: \* авторы принимают, что 10 % окисляется до  $CO_2$  и 90 % до  $CO$ .

Изменение расчетного значения теплоты шлакообразования достигает 1,77 кг чугуна и объясняется различием масс конечного шлака и принятой схемой шлакообразования.

Максимальное отклонение по статье «Физическая теплота миксерного шлака» составило 0,350 кг чугуна, что связано с отсутствием учета прихода в плавку миксерного шлака [7] или его теплоты [5 - 7], а также колебаниями его массы.

В связи со значительным различием полученных значений масс годного металла, конечного шлака и конвертерного газа, отклонения по величине статей их физической теплоты являются существенными и составляют соответственно 2,83, 2,91 и 2,81 кг чугуна.

Расчетные значения теплоты разложения оксидов железа шихты и карбонатов шлакообразующих материалов (извести) имеют максимальные расхождения 0,86 и 0,27 кг чугуна соответственно, что объясняется отсутствием учета прихода в плавку окалины металлолома [6 - 7] и теплоты затраченной на диссоциацию шлакообразующих материалов [7].

Максимальная разница суммарных потерь теплоты, связанных с физическими потерями металла, составляет 2,05 кг чугуна, что связано как с игнорированием соответствующих статей в балансе, так и массами теряемого металла.

По расходной статье «Тепловые потери конвертера» расхождение значений достигает 2,443 кг чугуна. При этом результаты расчетов по отдельным составляющим тепловых потерь [6] и [7] - а отличаются в разы.

Как отмечалось выше, затраты теплоты на испарение и диссоциацию влаги учитываются только в методиках [2, 4] и только для шлакообразующих материалов. Учитывая, что в указанных материалах сравнительной плавки влага не содержалась, эти статьи теплового баланса не рассматривались.

### Выводы

1. Известные и широко используемые в настоящее время на практике и в учебных целях методики расчета МиТБ ККП базируются на двух основных – А.М. Бигеева [2] и Г.Н. Ойкса, Х.М. Иоффе [7]. При этом алгоритмы расчета [6] и [7] - а предполагают задание в качестве

исходных данных расхода жидкого чугуна и металлолома, что существенно ограничивает область их применения.

2. При использовании методик [2 - 5] и [7] – а с соответствующими средними значениями эмпирических параметров (первое приближение), величины невязок материального и теплового балансов превысили допустимые значения. Необходимый уровень точности расчета материального баланса по [6] был достигнут за счет использования в виде исходных данных фактического расхода МШ, а в [7] - б – за счет использования системы уравнений.
3. В результате проведения итерационных расчетов последовательно МиТБ ККП в соответствии с рекомендациями методик [2 – 5], показано, что невозможно гарантированно добиться необходимой точности расчета без выхода за границы рекомендуемых интервалов используемых эмпирических параметров. Последнее очевидно указывает на несоответствие рекомендуемых значений коэффициентов современным технологическим и техническим условиям производства.
4. В соответствии с результатами итоговых расчетов МиТБ ККП (третье приближение), наиболее близкие значения удельного расхода жидкого чугуна и металлолома (по сравнению с фактическими данными) получены с использованием методик [4] и [7] - б. При этом отклонение не превышает ~ 1,1 кг/100 кг МШ (или ~ 1,0 % от приходной части баланса), что довольно существенно, особенно если учесть что невязка не должна превышать 0,2 %. Наиболее точно расход кислорода определен по [7]; отклонение от фактического значения не превышает 3 %. Лучший результат по расходу извести получен с использованием [2, 3] (отклонение не превышает 0,3 кг/100 кг МШ). Минимальное расхождение значений выхода годного металла (по отношению к фактическому) получено по методикам [5] и [7] - б. При этом достижение точного совпадения массы годного металла возможно за счет изменения эмпирических коэффициентов физических потерь металла.
5. Основными задачами дальнейших исследований являются: разработка усовершенствованной методики расчета МиТБ ККП; уточнение значений эмпирических параметров для современных условий производства; получение аналитических и / или эмпирических зависимостей для определения: расхода футеровки, содержания оксидов железа в шлаке, физических потерь металла и др.; учет использования различных видов металлоохлаждателей, магнезиальных флюсов и углеродсодержащих материалов в конвертерной плавке.

#### Список использованных источников:

1. Разработка компьютерной модели кислородно-конвертерного процесса / А.С. Седяров [и др.] //Металлы и литье Украины. – 2007. – № 5. – С. 18-20.
2. Бигеев А.М. Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов. Учебное пособие для вузов / А.М. Бигеев. – М.: Металлургия, 1982. – 160 с.
3. Бойченко Б.М. 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. Харлашин П.С. Методические указания и варианты заданий к выполнению курсовой работы «Расчет материального и теплового балансов кислородно-конвертерной плавки при переделе обыкновенных чугунов» по дисциплине «Теория и технология выплавки стали в конвертерах и мартеновских печах» (для студентов дневной формы обучения специальности 7.090.401 «Металлургия черных металлов», специализация «Металлургия стали») / Сост.: П.С. Харлашин, В.Я. Бакст. – Мариуполь: ПГТУ, 2005. – 20 с.
5. Шаповалов А.Н. Технология и расчет плавки стали в кислородных конвертерах: Методические указания для выполнения домашнего задания и контрольной работы для студентов специальности 150101 / А.Н. Шаповалов. – Новотроицк: НФ МИСиС, 2011. – 40 с.
6. Димніч А.Х. Методичні вказівки до курсової роботи «Матеріальний і тепловий баланс конвертерної плавки» (для студентів спеціальності 7.090401 МЧМ) / Укл.: А.Х. Димніч, А.Д. Рябцев, А.Г. Акініна [та ін.]. – Донецьк, 2005. – 44 с.
7. Ойкс Г.Н. Производство стали. Расчеты / Г.Н. Ойкс, Х.М. Иоффе, 4-е изд. Под ред. Г.Н. Ойкса. – М.: Металлургия, 1975. – 480 с.

**Bibliography:**

1. Development of a computer model of the BOF process / A.S. Sedliar [and others]// Metals and casting Ukraine. – 2007. – № 5. – P. 18-20. (Rus.)
2. Bigeev A.M. The mathematical description of the calculations and steelmaking processes. A manual for schools / A.M. Bigeev. - Moscow, Metallurgy, 1982. – 160 p. (Rus.)
3. Bojchenko B.M. Guidance for calculation of BOF melt for students of all majors / Compiled by: B.M. Bojchenko, S.V. Bochka. - Dnepropetrovsk: NMetAU, 2001. - 25 p. (Rus.)
4. Kharlashin P.S. Guidelines and options to perform tasks of the course work, "Calculation of material and heat balances of the oxygen-converter smelting iron to redistribute the ordinary" on the subject "Theory and technology of steelmaking converters and open-hearth furnaces" (for full-time students specialty 7,090,401 "Metallurgy ferrous metals, "specialty" Metallurgy of steel ") / Compiled by: P.S. Kharlashin, V.Y. Bakst. - Mariupol: PSTU, 2005. – 20 p. (Rus.)
5. Shapovalov A.N. Technology and the calculation of melting steel in oxygen converters: Guidelines for homework and tests for students majoring 150101 / A.N. Shapovalov. - Novotroick: NP MISA, 2011. – 40 p. (Rus.)
6. Dymnich A.H. Guidance for course work "Material and heat balance of converter smelting" (for students majoring 7.090401 МСНМ) / Compiled by: A.H. Dymnich, A.D. Riabtsev, A.G. Akinina [and others]. - Donetsk, 2005. - 44 p.
7. Oyks G.N. Production of steel. Calculations / G.N. Oyks, J.M. Joffe, 4th bridles. Ed. G.N. Oyksa. - Moscow, Metallurgy, 1975. - 480 p.

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

Статья поступила 30.10.2013

УДК 669.184.244.66:669.184.24

© Сущенко А.В.<sup>1</sup>, Попов Е.С.<sup>2</sup>, Сидорчук Р.С.<sup>3</sup>,  
Лигус Н.Н.<sup>4</sup>, Орличенко М.П.<sup>5</sup>

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СОПЛОВОГО БЛОКА КИСЛОРОДНОЙ ФУРМЫ И  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДУТЬЕВОГО РЕЖИМА ПЛАВКИ ПРИ  
ИЗМЕНЕНИИ ШИХТОВЫХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЙ  
В ККЦ ПАО «МК «АЗОВСТАЛЬ»**

*Разработаны, опробованы и внедрены в производство (в конвертерном цехе ПАО «МК «Азовсталь», входящем в ООО «Метинвест холдинг») новые конструкции наконечников кислородных фурм и дутьевые режимы конвертерной плавки, обеспечившие улучшение технико-экономических показателей выплавки стали в изменившихся шихтовых и производственных условиях работы цеха.*

**Ключевые слова:** конвертерная плавка, шихтовые и производственные условия, дутьевой режим, кислородная фурма, сопловой блок, оптимизация параметров, технико-экономические показатели.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь; [sushchenko.andrei@gmail.com](mailto:sushchenko.andrei@gmail.com)

<sup>2</sup> директор по технологии и качеству ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь; [evgeniy.popov@azovstal.com.ua](mailto:evgeniy.popov@azovstal.com.ua)

<sup>3</sup> начальник технологического управления ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь; [sidorchuk-rs@azovstal.com.ua](mailto:sidorchuk-rs@azovstal.com.ua)

<sup>4</sup> начальник конвертерного цеха ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь; [nikolay.ligus@azovstal.com.ua](mailto:nikolay.ligus@azovstal.com.ua)

<sup>5</sup> начальник сталеплавильного отдела технологического управления ПАО «МК «Азовсталь», входящий в ООО «Метинвест холдинг», г. Мариуполь [mikhail.orlichenko@azovstal.com.ua](mailto:mikhail.orlichenko@azovstal.com.ua)