

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии  
и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН**

**80 лет**

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

**УДК 669.1; 546.1; 546.3**

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.  
Сборник научных трудов.  
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

*Редакционная коллегия*

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

## **Физико-химическое описание и математическая модель взаимодействия компонентов шлаковой и металлической фаз в кислородном конвертере и агрегате ковш-печь**

*О.А. Комолова, Б.Н. Огороков, К.В. Григорович*

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-53-65

В современном мире конкурентной борьбы за рынок между металлургическими предприятиями все острее становится вопрос качества и себестоимости выпускаемой продукции. Повышение требований к качеству стали предопределяет необходимость точного попадания в узкий диапазон заданного химического состава для конкретных марок стали.

Для получения заданного качества готовой продукции необходимо контролировать и управлять процессом производства стали на каждом из этапов металлургического передела, начиная от расчета шихты до момента получения готовой продукции.

Технологический процесс отбора проб и замер температуры металла вызывает удлинение цикла обработки и позволяет оценивать характеристики металлической ванны с запаздыванием, а для эффективного управления высокоскоростными и высокотемпературными металлургическими процессами необходимо знать состояние системы заранее. Заблаговременный прогноз позволит рассчитать оптимальные управляющие воздействия на технологический процесс. Поэтому актуальна разработка и использование имитационных математических моделей, адекватно описывающих все основные параметры состояния системы. Это позволит эффективно использовать время и энергоресурсы, проводить процесс по наиболее рациональной траектории. Для создания прогнозирующих программных комплексов необходимо иметь физико-химические описания современных металлургических процессов и математические модели, учитывающие состав взаимодействующих фаз и тепловые режимы, отражающие динамические характеристики процессов плавления, растворения, перемешивания, скорости взаимодействия между всеми компонентами шлаковой и металлической фаз, адекватно описывающие реакции процесса на управляющие воздействия.

Корректная работа современных АСУ возможна только при наличии прогнозирующих математических моделей. С появлением высокоскоростных вычислительных машин особую роль с середины двадцатого столетия

приобрело математическое моделирование [1]. Прогнозирование дальнейшего развития того или иного процесса для самых разнообразных видов хозяйственной деятельности всегда являлось актуальной задачей [2 – 4]. Исключением не стали процессы выплавки и внепечной обработки стали, для управления которыми необходимо учитывать сложные конструкции агрегатов, технологические операции, распределение и движение материальных и энергетических потоков и т.д. [5]. Математическое моделирование позволяет рассмотреть самые различные варианты исследуемого процесса и найти в рамках данной модели наилучший режим его осуществления.

Сталеплавильный процесс, как объект математического моделирования, представляет собой сложную систему, в которой действуют процессы, подчиняющиеся законам термодинамики, физики, тепло- и массопереноса, кинетики и т. д.

Создание оригинальных физико-химических описаний, основанных на положениях термодинамики, законах тепло- и массообмена, процессах растворения вводимых раскислителей, модификаторов, шлакообразующих материалов и ферросплавов, позволяющих рассчитывать состояние системы в каждый момент времени с учетом протекания высокотемпературных окислительно-восстановительных реакций, необходимо для разработки имитационных моделей. Модели данного класса не нуждаются в большом количестве коэффициентов, требующих адаптации. При разработке математических динамических моделей, основанных на фундаментальных закономерностях, проводится комплексный анализ всех возможных взаимодействий, происходящих в ванне, становится возможным определение ведущих факторов и зон риска, определение закономерностей, которые при однофакторном анализе не поддаются идентификации.

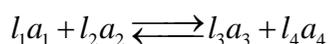
Интегрирующими, т.е. объединяющими все процессы, происходящие при выплавке и внепечной обработке стали, являются шлаковая и металлическая фазы. Химический состав и температура шлаковой и металлической фаз практически полностью определяют траекторию развития процесса.

Наличие в системе реализации принципа локального равновесия, в силу того, что равновесие наступает в бесконечно малом физическом объеме практически мгновенно по сравнению с неравновесными изменениями в макрообъеме [6], позволяет использовать весь математический аппарат классической термодинамики для неравновесных процессов.

Постулаты Л. Онзагера все прошлое столетие не применялись в расчетах, так как они сформулированы для малого отклонения описываемого процесса взаимодействий от равновесия, наблюдаемые отклонения от равновесия чаще всего достаточно далеки [8]. Процесс выплавки и внепечной обработки стали характеризуются высокими температурами, что позволяет считать, что кинетическая стадия не может быть лимитирующей, лимитирующей стадией является массоперенос компонентов в зону взаимодействия, как процесс гораздо более медленный по сравнению с кинетическими процессами. Это подтверждает наличие стационарного неравновесного состояния (СНС) в рафинировочных процессах [7, 9]. Условием необходимости стремления системы к СНС является именно линейная зависимость скорости взаимодействия компонентов от движущей силы процесса [10].

Использование для управления сталеплавильным процессом балансовых моделей в статических системах зародилось еще в начале второй половины прошлого века [11, 12]. Любая полная балансовая модель должна включать кроме балансов масс компонентов по взаимодействующим фазам, общего баланса масс и тепла, особую систему уравнений, представляющих собой систему, описывающую неравновесную связь между компонентами различных фаз [13-16].

При создании математического описания взаимодействий между компонентами системы шлак-металл учитывалось, что при выплавке и внепечной обработке стали металлургические системы не достигают равновесия, а находятся в стационарном неравновесном состоянии; что химические реакции между компонентами системы шлак – металл протекают одновременно; направление реакций определяет градиент химического потенциала; возможно протекание как прямых, так и обратных реакций по следующей схеме:



где  $a_1, a_2$  – исходные компоненты реакции;

$a_3, a_4$  – продукты реакции;

$l_1, l_2, l_3, l_4$  – стехиометрические коэффициенты реакции.

На основании этого допущения была создана “матрица” реакций между основными компонентами системы шлак – металл.

В соответствии с постулатами Л. Онзагера сделано допущение, что скорость реакции пропорциональна градиенту химического потенциала и рассчитывается по формуле:

$$V_i = -S_{\text{пов}} L \text{grad} \mu_i, \quad 1)$$

где  $V_i$  - скорость взаимодействия  $i$ -ого компонента, моль/с;

$S_{\text{пов}}$  - поверхность взаимодействия, м<sup>2</sup>;

$L$  - коэффициент Л. Онзагера, моль<sup>2</sup>/(Дж·с·м);

$\text{grad} \mu_i$  - градиент химического потенциала  $i$ -ого компонента, Дж/(моль·м).

Поскольку,  $\text{grad} \mu_i = -\frac{A}{\delta}$ , то

$$V_i = S_{\text{пов}} L \frac{A}{\delta} = -S_{\text{пов}} L \frac{RT}{\delta} \ln \frac{K_{\phi}}{K_p} = S_{\text{пов}} L \frac{RT}{\delta} \ln \frac{K_p}{K_{\phi}}, \quad 2)$$

где  $A$  - химическое сродство  $A = -RT \ln \frac{K_{i,\phi}}{K_{i,p}}$ , Дж/моль;

$\delta$  - толщина пограничного слоя, м;

$K_p$  и  $K_{\phi}$  – равновесная и фактическая константа реакции.

Все компоненты, находящиеся в зоне взаимодействия в системе шлак – металл находятся в равных условиях массопереноса, поэтому было сделано допущение, что площадь поверхности взаимодействия, коэффициент Онзагера, температура и толщина пограничного слоя одинаковы для всех реакций.

Для расчета скоростей реакций взаимодействий между компонентами системы шлак – металл был разработан итерационный алгоритм, в котором единица времени (одна секунда) разбивается на интервалы.

Внутри интервала рассчитывали значения  $K_p$  и  $K_{\phi}$  для каждой из реакций. Реакцию, имеющую наибольшее значение  $\ln \frac{K_p}{K_{\phi}}$ , принимали за базовую.

Скорость протекания базовой реакции за один интервал времени принимали равной  $V_{\text{баз}} = 1$  моль/интервал, скорости всех остальных реакций пересчитывались по формуле:

$$V_i = V_{\text{баз}} \ln \frac{K_{\text{p},i}}{K_{\text{ф},i}} / \ln \frac{K_{\text{p},\text{баз}}}{K_{\text{ф},\text{баз}}} \quad 3)$$

После расчета скоростей протекания реакций, представленных в “матрице” реакций, проводили пересчет химического состава металла и шлака и переходили с новыми характеристиками состава на следующий интервал времени, этот цикл продолжался до тех пор, пока сумма  $\ln \frac{K_{\text{p}}}{K_{\text{ф}}}$  по всем химическим реакциям “матрицы” не принимала минимальное значение.

Кислородно-конвертерный процесс характеризуется сложной системой взаимодействия газовой (кислородный факел, инертный газ донной продувки и образующиеся конвертерные газы), твердой (футеровка, нерастворенные сыпучие материалы, намороженный чугуи и лом) и жидкой (жидкий металл и шлак) фаз. Кислородный факел при встрече с реакционной зоной в своем составе имеет не только кислород, но монооксид и двуокись углерода, при этом его температура значительно больше температуры технического кислорода дутья. Реакционная зона представляет собой газо-шлако-металлическую систему, в которой существенную роль играет химический состав конвертерных газов.

Парциальное давление кислорода рассчитывается по формуле

$$P_{O_2} = \frac{J_{O_2}^{\text{cmp}2}}{J_{O_2}^{\text{cmp}2} + J_{CO_2}^{\text{cmp}2} + J_{CO}^{\text{cmp}2} + J_{N_2}^{\text{cmp}2} + J_{Ar}^{\text{cmp}2}} P_0, \quad 4)$$

где  $P_{O_2}$  - парциальное давление кислорода;

$J_{O_2}^{\text{cmp}2}$  – количество кислорода в факеле окислительной струи при достижении им реакционной зоны, кмоль;

$J_{N_2}^{\text{cmp}2}$  – количество  $N_2$  в факеле окислительной струи при достижении им реакционной зоны, кмоль.

$J_{CO}^{\text{cmp}2}$  – количество  $CO$  в факеле окислительной струи при достижении им реакционной зоны, кмоль;

$J_{CO_2}^{cmp2}$  – количество  $CO_2$  в факеле окислительной струи при достижении им реакционной зоны, кмоль;

$P_0$  - давление среды.

Методика расчета скоростей взаимодействия в реакционной зоне аналогична методике расчета взаимодействий компонентов в системе шлак – металл. В роли окислителей выступают кислород и двуокись углерода. Зная скорость окисления какого-либо компонента в реакционной зоне (желательно железа  $V_{O_2}^{Fe}$ , т.к. исключается возможность его полного окисления), можно определить скорости окисления всех остальных элементов, а также состав и количество металла, шлака и газов, покидающих зону взаимодействия.

Скорость окисления железа кислородом определяется по формуле

$$V_{O_2}^{Fe} = -\frac{1}{k_{FeO}^{Fe-O_2}} S \cdot L_K \cdot \frac{1}{\delta} RT^{rz} \ln \frac{K_{Fe-O_2}^{факт.}}{K_{Fe-O_2}^{равн.}}, \quad (5)$$

где  $k_{FeO}^{Fe-O_2}$  - стехиометрический коэффициент реакции, равный 1;

$T^{rz}$  - температура реакционной зоны, К;

$K_{Fe-O_2}^{факт.}$  - фактическая константа химической реакции;

$K_{Fe-O_2}^{равн.}$  - константа равновесия химической реакции.

С учетом того, что мы принимаем стопроцентное усвоение кислорода, достигшего реакционной зоны, то справедливо следующее выражение

$$J_{O_2}^{rz} = k_{O_2}^{Fe-O_2} \cdot V_{O_2}^{Fe} + k_{O_2}^{Mn-O_2} \cdot V_{O_2}^{Mn} + k_{O_2}^{C-O_2} \cdot V_{O_2}^C + k_{O_2}^{Si-O_2} \cdot V_{O_2}^{Si} + k_{O_2}^{P-O_2} V_{O_2}^P + k_{O_2}^{S-O_2} \cdot V_{O_2}^S, \quad (104)$$

где  $J_{O_2}^{rz}$  - количество кислорода в факеле при встрече с реакционной зоной, кмоль/с;

$k_{O_2}^{Fe-O_2}$ ,  $k_{O_2}^{Mn-O_2}$ ,  $k_{O_2}^{Fe-O_2}$ ,  $k_{O_2}^{C-O_2}$ ,  $k_{O_2}^{P-O_2}$ ,  $k_{O_2}^{S-O_2}$  - стехиометрические коэффициенты реакций.

Адекватность функционирования разработанных математических моделей проверяли по данным 10 промышленных плавков в 90 т кислородном конвертере [17].

Масса чугуна на плавках составляла от 80 до 85 т, масса лома от 5 до 10 т, масса извести 7 т. Перед началом продувки на дно конвертера загружали 2 т извести и весь лом, затем заливали чугун и начинали продувку кислородом. В течение первых 5 минут продувки загружали остальные 5 т извести. Отбор проб и замер температуры осуществляли на 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 22 минутах продувки. Первые четыре минуты высота фурмы над уровнем спокойной ванны составляла 160 см, затем высоту уменьшали до 120 см, расход кислорода изменялся в диапазоне от 190 м<sup>3</sup>/мин до 220 м<sup>3</sup>/мин.

Сравнение результатов контроля температуры и химического состава металла и шлака в процессе продувки в кислородном конвертере при опытных плавках и расчетных значений представлено на рисунке 1.

Хорошее соответствие опытных и расчетных значений химического состава металла и температуры говорит о корректности математической модели взаимодействия между компонентами шлаковой и металлической фаз и возможности ее использования для моделирования кислородно-конвертерного процесса.

С использованием разработанного физико-химического описания процессов взаимодействия между компонентами системы шлак-металл было создано математическое описание, алгоритмы и программное обеспечение “АКП”, моделирующее процессы обработки металла на агрегате ковш-печь. Исходными данными для программного обеспечения “АКП” являются: геометрические размеры ковша и футеровки, тип футеровки, количество продувочных устройств; масса, состав, температура металла и шлака, поступающего на обработку; масса, химический состав, температура и время осуществления присадок; характеристики электрического режима и режима продувки инертным газом.

На Рис. 1 представлена структурная схема динамической модели “АКП”, состоящей из соответствующих подмоделей: усвоения присадок, электрического нагрева, перемешивания, взаимодействия шлака и металла, материального и теплового балансов всей системы. Характеристики каждой из подмоделей оказывают непосредственное влияние на все остальные составляющие и весь процесс в целом (

Рис.3. Структурная схема модели “АКП”

).

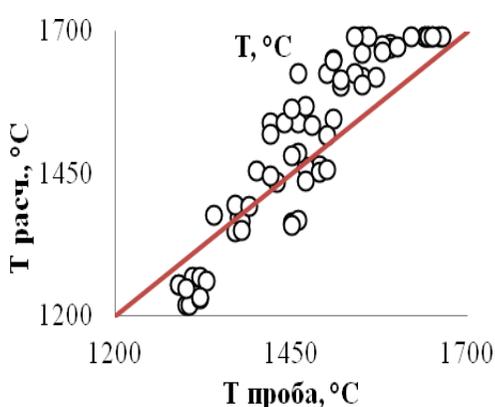
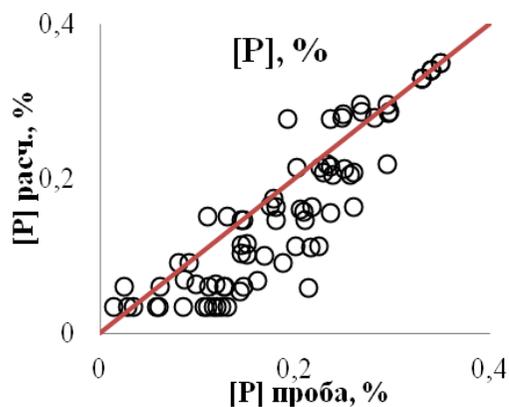
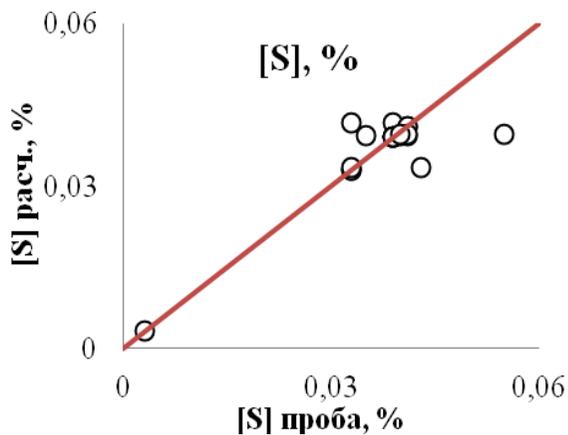
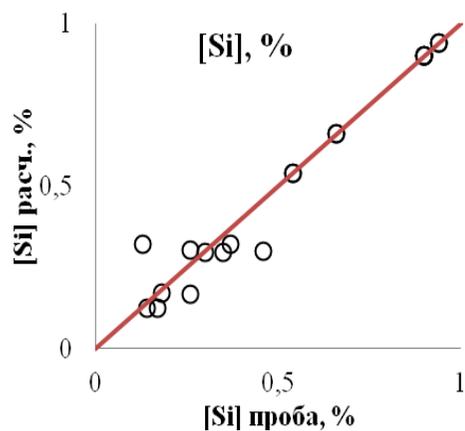
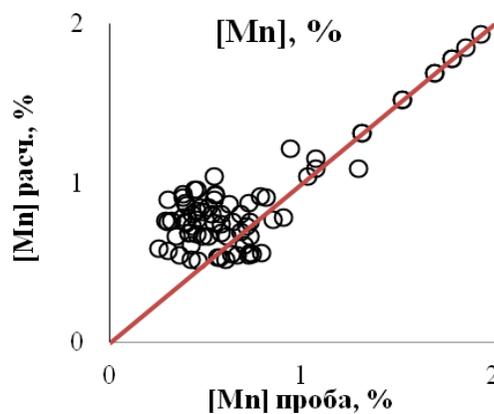
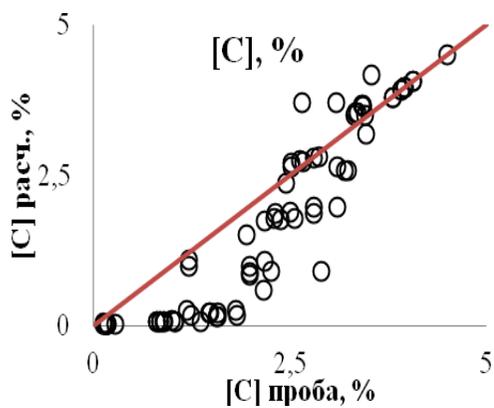


Рис.1. Сравнение результатов контроля температуры и химического состава металла и шлака в процессе продувки в кислородном конверте при опытных плавках и расчетных значений.

“АКП” в режиме реального времени рассчитывает химический состав и температуру металла и шлака в течение всего процесса внепечной обработки.

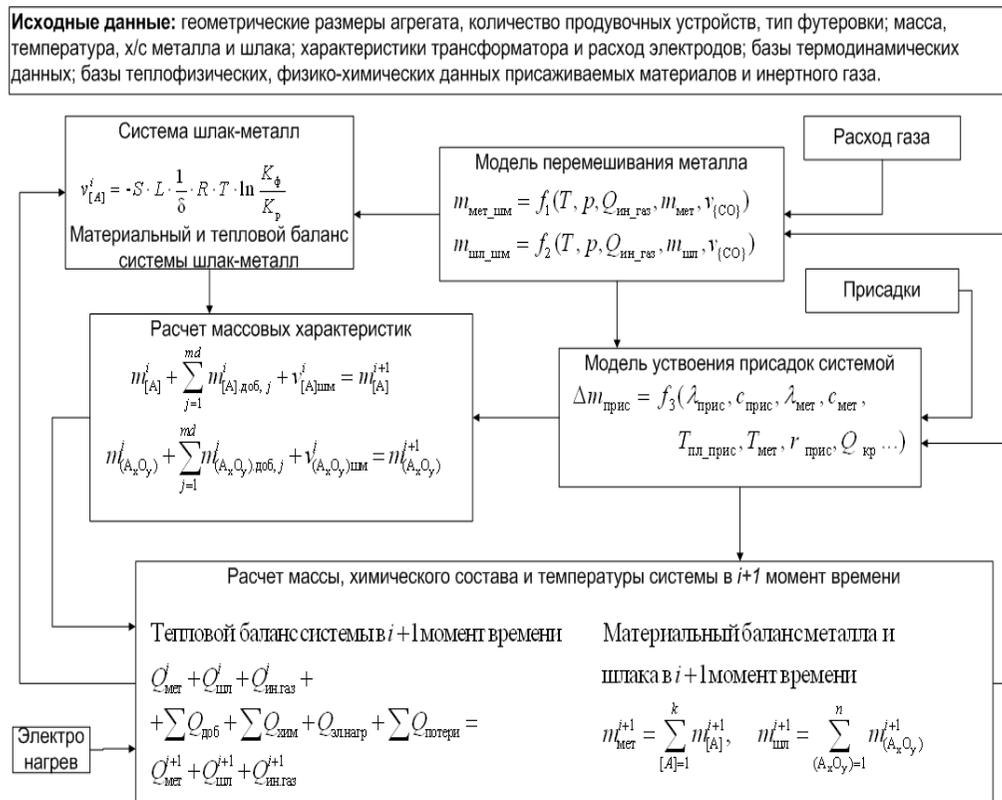


Рис.3. Структурная схема модели “АКП”

При растворении добавок меняется химический состав, масса, температура шлака и металла, поэтому в модели сделано допущение, что сначала в металлическую и шлаковую фазу переходят все компоненты присадок, которые должны были раствориться, а только потом протекают химические реакции.

Концентрацию каждого компонента металла можно рассчитать по следующей формуле:

$$[Me]_i^k = \frac{[Me]_i^m \cdot m_{мет}^i + \sum_{j=1}^{md} (m_{мет\_доб,j}^i \cdot [Me]_{мет\_доб,j}^i)}{m_{мет}^i + \sum_{j=1}^{md} m_{мет\_доб,j}^i},$$

где  $[Me]_i^k$  - содержание компонента  $[Me]$  в металле после учёта растворения присадок, %;

$[Me]_i^h$  - содержание компонента  $[Me]$  в металле до учёта растворения присадок, %;

$[Me]_{мет.доб, j}$  - содержание компонента  $[Me]$  в присадке  $j$ , %.

Концентрацию каждого компонента шлаковой фазы можно рассчитать по следующей формуле:

$$(Me_xA_y)_i^k = \frac{(Me_xA_y)_i^h \cdot m_{шл}^i + \sum_{j=1}^{sd} m_{шл.доб, j}^i \cdot (Me_xA_y)_{шл.доб, j}}{m_{шл}^i + \sum_{j=1}^{sd} m_{шл.доб, j}^i + m_{раст.фуг}^i},$$

где  $(Me_xA_y)_i^k$  - содержание компонента  $(Me_xA_y)$  в шлаковой фазе после учёта растворения присадок, %;  $(Me_xA_y)_i^h$  - содержание компонента  $(Me_xA_y)$  в шлаковой фазе до учёта растворения присадок, %;  $(Me_xA_y)_{шл.доб, j}$  - содержание компонента  $(Me_xA_y)$  в шлакообразующих присадках, %.

Для определения текущего химического состава и температуры шлака и металла в любой момент времени необходимо рассчитать мгновенный материальный баланс трехфазной системы.

Общий мгновенный материальный баланс процесса обработки металла на АКП описывается выражением:

$$m_{мет}^i + m_{шл}^i + m_{газ}^i + \sum_{j=1}^{md} m_{мет.доб, j}^i + \sum_{j=1}^{sd} m_{шл.доб, j}^i + m_{ин.газ, j}^i + m_{раст.фуг}^i = m_{мет}^{i+1} + m_{шл}^{i+1} + m_{газ}^{i+1}$$

Где  $m_{мет}^i$ ,  $m_{мет}^{i+1}$  - масса металла в моменты времени  $i$  и  $i+1$  соответственно, кг;

$m_{шл}^i$ ,  $m_{шл}^{i+1}$  - масса шлака в моменты времени  $i$  и  $i+1$  соответственно, кг;

$m_{газ}^i$ ,  $m_{газ}^{i+1}$  - масса газ в моменты времени  $i$  и  $i+1$  соответственно, кг/с.

Проверку адекватности работы программного обеспечения “АКП” проводили на массиве из тридцати промышленных плавок трубных марок стали, выполненных на агрегате ковш-печь ОАО “ОМК-Сталь”. По ходу каждой плавки были отобраны пробы металла и сделаны замеры температуры. Вместимость ковша – 150 т, масса печного шлака,

попадающего в ковш, изменялась в пределах от 0,5 т до 1,5 т, перемешивание металла осуществляли путем продувки металла инертным газом через донные пробки, расход аргона на одну продувочную пробку меняли в диапазоне от 50 до 800 л/мин в зависимости от проводимых технологических операций. В начале процесса обработки вводили раскислители и шлакообразующие материалы, в середине процесса отдавали основные легирующие элементы, раскислители и шлакообразующие.

Рисунок 4 показывает сравнение результатов расчетных и опытных характеристик расплава процесса обработки металла на агрегате ковш-печь.

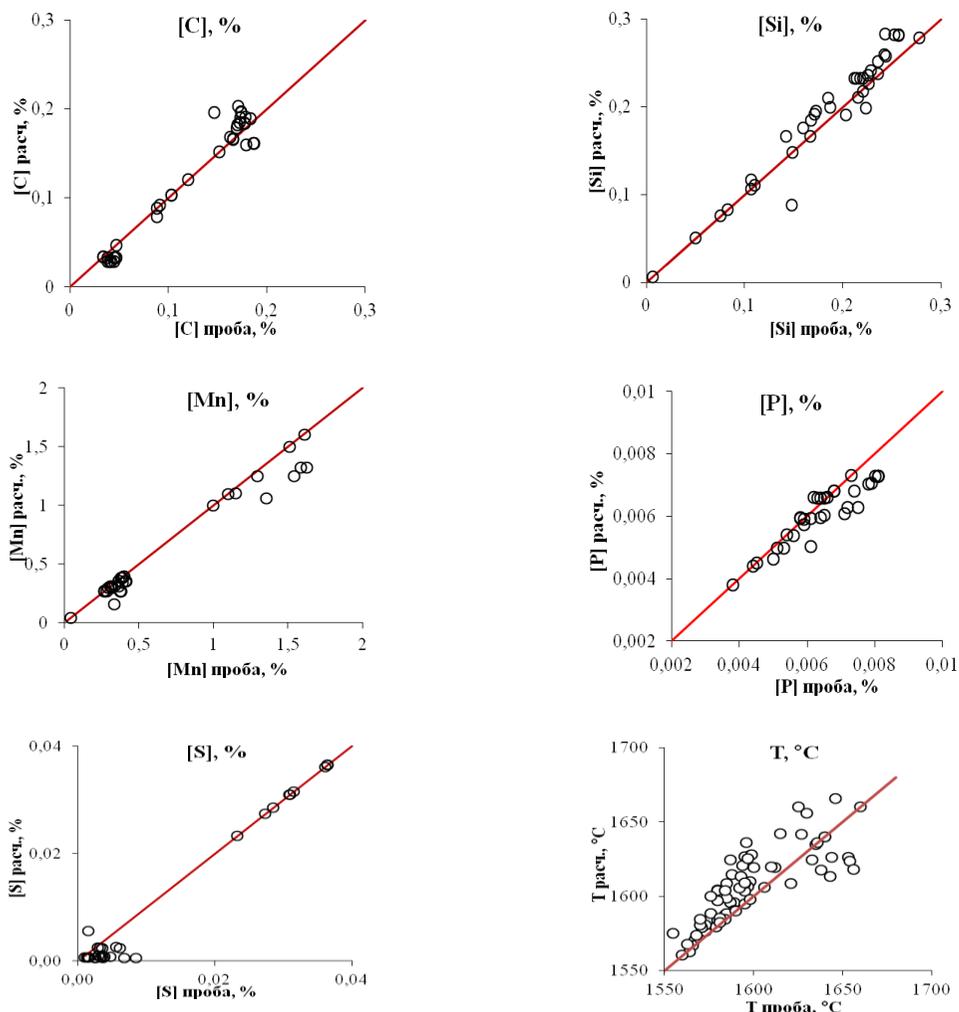


Рис.4. Сравнение результатов расчетных и опытных характеристик расплава процесса обработки металла на агрегате ковш-печь.

Хорошее соответствие опытных и расчетных значений химического состава металла и температуры говорит о корректности разработанных математических моделей и программного обеспечения «АКП» и возможности ее использования для моделирования процесса обработки металла на агрегате.

## Выводы

1. На основе применения положений термодинамики необратимых процессов разработано физико-химическое описание и математическая модель взаимодействий между компонентами шлаковой и металлической фаз, происходящих в кислородном конвертере и агрегате ковш-печь.

2. Создано программное обеспечение для динамического моделирования процесса обработки металла в агрегате ковш-печь «АКП», состоящее из разработанных математических моделей описывающих взаимодействия между компонентами шлаковой и металлической фазы, процессы усвоения присадок, нагрева металла, перемешивания металла.

3. На массиве из тридцати промышленных плавок трубных марок стали, обработанных на агрегате ковш-печь ОАО «ОМК-Сталь», проведена проверка работы программного обеспечения «АКП» по результатам химического анализа проб и замеров температуры металла. Экспериментально доказано, что программное обеспечение «АКП» позволяет адекватно описывать динамические изменения основных характеристик металла, шлака и реакции процесса на управляющие воздействия.

## Литература

1. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии: учебник для вузов. – Кемерово; М.: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат-АСТШ, 2006. – 431 с.
2. Дьячко А.Г. Математическое и имитационное моделирование производственных систем. – Москва: МИСиС, 2007, 538 с.
3. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 2001. 343 с.
4. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Наука. Физматлит.ю 2001. – 320 с.
5. Б.Н. Огороков, Б.Н. Трушина, С.В. Коминов и др. Оборудование сталеплавильных цехов. – М.: МИСиС, 1990.
6. Агеев Е.П.. Неравновесная термодинамика в вопросах и ответах. –М. “Отдел оперативной полиграфии Химического факультета”. – МГУ. 1999. -114 с.
7. Огороков Б.Н. Термодинамика необратимых процессов и процессы сталеплавильного производства. Международная конференция – диспут. Металлургия и Металлурги XXI века. Сборник трудов каф. Металлургии стали МИСиС, М.: 2001 г, 454-499 с.

8. Яковлев Ю.Н., Голуб И.В.. Расчет неравновесности процессов в сталеплавильных ваннах. Теория и практика кислородно-конвертерных процессов XI Международная научно-техническая конференция. Металлы и литье. Украина 2005, №№3-4, стр. 27-29.
9. Чиграй И. Д., Колпаков С. В., Нехорошев А. Н. и др. Использование статистической модели для управления кислородно-конвертерной плавкой на Ново-Липецком металлургическом заводе // Сталь. -1970. -№12. -с. 1078-1081.
10. П. Глинсдорф, И. Пригожин Термодинамическая теория структуры устойчивости и флуктуаций. –М.: Мир. – 1973. -280 с.
11. Огороков Б.Н., Вишкарев А.Ф. Термодинамика необратимых процессов, методологическая основа построения ФФХММ. // Изв. АН РАН “Металлы”. 1993. №4, с. 60-69.
12. Ферми Э. Термодинамика // Харьков. Харьковский университет. 1969. -139 с.
13. Жуков Н.Н., Огороков Б.Н., Коминов С.В. Определение погрешности работы балансовых систем расчета шихты на кислородно-конвертерный процесс // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. -1986. -№5. – с.29-31.
14. Строганов А.И., Распределение кислорода между металлом и шлаком при сталеплавильном процессе // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 1963. - №3. – с. 46-52.
15. Огрызкин Е.Н. Закономерности установления определенной окисленности шлака в кислородном конвертере // Сб.: “Теория и практика интерпретации процессов в конвертерных и мартеновских печах”. Труды совещания. – М.: Металлургия. – 1965. – с. 215-222.
16. Коминов С.В., Явойский А.В., Огороков Б.Н. и др. Взаимосвязь параметров конвертерной ванны в конце продувки // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. -1976. - №7. – с. 45-50.
17. Хемдан Саббах Солиман Омар Разработка системы расчеты шихты для конвертерного процесса в условиях “Iron and steel Co” и изучение динамики окисления компонентов ванны в начальный период наведения шлака. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1990.