

УДК 669.184.244.66.012.1

В.С.Богушевский, Е.А.Сергеева, С.В.Жук

*Национальный технический университет Украины “КПИ”*

## **МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА МАССЫ И ТЕПЛОТЫ В КВАЗИГОМОГЕННОМ ПРИБЛИЖЕНИИ**

### **Введение**

Сложные процессы переноса в ванне сталеплавильных агрегатов происходят в условиях вынужденно движущейся, термохимически реагирующей многокомпонентной среды, подвергаемой фазовым превращениям. Ванна как многосвязный объект представляет собой трехфазную, многокомпонентную систему, в которой протекают аэрогидродинамические, массо-, теплообменные, химические и другие необратимые процессы, определяющие кинетику рафинирования. Использование кислородного дутья изменило механизм физико-химических процессов и настолько увеличило скорость их протекания, что последняя не может быть оценена с помощью соотношений равновесного состояния. Все это усложняет теоретический анализ явлений и делает его вообще неосуществимым, если не прибегать к различным упрощениям и условностям, сохраняя при этом возможность практического использования решения.

Современный уровень развития измерительной техники не позволяет осуществить в агрессивной, высокотемпературной, химически реагирующей среде прямой контроль скоростей протекания физико-химических процессов, определяющих управляемые координаты объекта – массовые доли элементов в металле и шлаке, их температуру. Исследования же на “холодных” моделях дают грубое приближение к реальным процессам. Поэтому изучение, расчет, контроль и управление переходным режимом в объектах с различными

способами инициирования движения расплава производят путем математического моделирования процессов в реальном масштабе времени.

Кинетика сталеварения – это синтез процессов переноса количества движения, массы и теплоты на фоне химически реагирующего течения [1 – 4]. Наиболее полно и достоверно этот вопрос исследовал Д.А.Франк-Каме-нецкий [5]. Однако в настоящее время отсутствуют строго научные, согласующиеся с практикой, фундаментальные исследования по системному изучению взаимосвязанных явлений переноса в сталеплавильной ванне.

### **Постановка задачи**

Рассмотрение возможности использования положений теории, изложенной в [5], применительно к сталеплавильному (в частности конвертер-ному) процессу.

### **Результаты исследований**

Реально конвертерная ванна – тяжелая, неидеальная, сжимаемая и многокомпонентная жидкость с большим числом внутренних связей между параметрами и их взаимным, в большинстве случаев нелинейным, влиянием.

Дутьевой режим обуславливается регламентированными во времени положением фурмы и давлением кислорода, а также конструктивными особенностями фурменного наконечника. Эти параметры взаимосвязаны и имеют общее следствие – глубину проникновения дутьевой струи в расплав (аналог упругости или продуваемости ванны). По ходу продувки для ванны характерно волновое изменение параметров. Гидродинамический режим продувки, носящий характер развитой турбулентности, осложненной колебательными составляющими, – управляющий фактор процесса. Поскольку процесс рафинирования металла неизотермический, то массообмен в ванне всегда сопровождается переносом теплоты. Считая при стехиометрических условиях однозначности протекания процесса продувки гидродинамические, температурные и теплофизические параметры ванны общими для всех

элементов, на основании подобия полей массосодержания и температуры обобщенное уравнение переноса в движущейся ванне с химическим превращением ее элементов можно представить в виде:

$$\partial\psi(x, y, z, \tau)/(60\partial\tau) = \chi\nabla_{x,y,z}\psi(x, y, z, \tau) + w\mathbf{grad}\psi(x, y, z, \tau) + \xi, \quad (1)$$

где  $\psi$  – потенциал переноса;  $\psi \in R, t$  (здесь и далее первый член перечня используется в уравнении массопереноса):  $R$  – массовая доля элемента в смеси, % ( $R \in \text{Si, Mn, P, C, Fe}$  в порядке понижения степени химического сродства к кислороду),  $t$  – температура ванны,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $x, y, z$  – пространственные координаты, м;  $\tau$  – время, отсчитываемое от начала продувки, мин;  $\chi$  – коэффициент молекулярного переноса (кинетический коэффициент, характеризующий молекулярную проводимость системы по отношению к соответствующему виду потока) ( $\chi \in D, a$ ). Здесь  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в ванне, равный  $3,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$  [6];  $a$  – температуропроводность ванны,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\nabla_{x, y, z}$  – оператор Лапласа, равный сумме вторых частных производных по геометрическим координатам;  $w$  – вектор скорости потока ванны (центра тяжести частицы), м/с;  $\mathbf{grad}\psi$  – вектор отрицательного градиента потенциала переноса ( $\mathbf{grad}\psi \in \mathbf{grad}R, \mathbf{grad}t$ ):  $\mathbf{grad} R$  – массовой доли  $R$ -го элемента в ванне, %/м,  $\mathbf{grad} t$  – температуры ванны,  $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ;  $\xi$  – объемная плотность потока субстанции вследствие химических реакций и физических превращений ( $\xi \in M_R j_R / 10\rho_s / c\rho$ ). Здесь  $M_R$  – молярная масса  $R$ -го элемента ванны, г/моль;  $\rho = 3500$  – плотность эмульгированной ванны, определяемая как смесь по правилу аддитивности ее составляющих [2],  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $j_R$  – объемная плотность молярного потока  $R$ -го элемента ванны, моль/ $(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ;  $c$  – средняя удельная теплоемкость ванны при постоянном давлении в интервале рабочих температур, Дж/(кг · К);  $s \in R, \text{л}, j; q_R, q_{\text{л}}, q_j$  – объемная плотность теплового потока в ванне вследствие протекания процесса с участием соответственно  $R$ -го элемента, химически

неактивной добавки лома и химически активной добавки  $j$ -го материала (известняк, известь, плавленый шпат и т.д.), Вт/м<sup>3</sup>.

Скорость окисления примесей сталеплавильной ванны зависит от скоростей подвода окислителя к частицам жидкой фазы и самой химической реакции. Так как сталеплавильный процесс необратим, при рассмотрении химических реакций можно ограничиться только прямым взаимодействием. Согласно законам классической кинетики (законы Аррениуса и действующих масс) в общем виде скорость химической реакции с участием  $R$ -го элемента можно выразить как [7]:

$$j_R = 0,01K_R \prod_{i=1}^R R_i^{n_i}, \quad (2)$$

где  $K_R = Z_R \exp[-E_R/(R_m \cdot T)]$  – аррениусова константа скорости реакции с участием  $R$ -го элемента, моль/(м<sup>3</sup> · с). Здесь  $Z_R$  – предэкспоненциальный множитель для реакции с участием  $R$ -го элемента, моль/(м<sup>3</sup> · с);  $E_R$  – энергия активации химической реакции с участием  $R$ -го элемента, Дж/моль;  $R_m$  – молярная газовая постоянная идеального газа, равная 8,31 Дж/(моль · К);  $T$  – термодинамическая температура среды, К;  $i$  – порядковый номер исходных компонентов прямой реакции с участием  $R$ -го элемента;  $n_R$  – показатель степени, соответствующий стехиометрическому коэффициенту или порядку реакции с участием  $R$ -го элемента.

В замкнутой автотермической системе скорость реакций лимитируется потоком исходных веществ. Чтобы скорость рафинирования ванны не достигла скорости взрыва, подводимый кислород ограничивают стехиометрически.

Так как сталеплавильные агрегаты работают периодически, их материальный и тепловой баланс составляются на массу садки. Уравнения переноса замыкаются граничными условиями в виде интегральных соотношений по кислородному и тепловому эквивалентам исходного материала (чугуна) [8] и соотношением, согласно которому объемная плотность теплового потока в ванне выражается:

$$q_s = \pm Q_s j_s, \quad (3)$$

где  $Q_s$  – молярная теплота химической реакции с участием  $s$ -го компонента ванны, Дж/моль. Знак “+” относится к экзотермическим реакциям, знак “–” – к эндотермическим.

Принимая ряд гипотез, рассмотрим решение задачи для кислородного конвертера с реакциями смешанного типа, включающими соизмеримые химические и диффузионно-гидродинамические кинетические звенья (автотермический объект со смешанным контролем протекания процесса).

Скорость химических реакций в ходе выгорания примесей ванны, с одной стороны, согласно закону Аррениуса возрастает из-за увеличения температуры, с другой – падает в результате уменьшения массосодержания реагирующих веществ. Преобладает последний фактор. Общая скорость массопереноса определяется наиболее медленной стадией. Для упрощения считаем, что вклад в общую скорость переноса скоростей транспорта газообразного кислорода к месту реакции в объеме ванны и химического взаимодействия реагентов равновелик. Поэтому можно принять, что эффективная скорость массопереноса в два раза меньше любой составляющей.

Основным режимным параметром системы является вынужденная скорость смещения частиц рабочего тела. С целью упрощения задачи в основу расчетов берем приближенную модель одномерного вертикального течения ванны В.И.Явойского с восходящим потоком в периферийных участках реторты и нисходящим в центральной [2].

В движущейся ванне перенос вещества определяется силой инерции (сохранением импульса) или изменением количества движения – уравнением, которое в интегральной форме для гидродинамически “тонкого” тела (с постоянной по модулю скоростью среды в ее объеме) приведено в работе [9]. Модуль скорости движения ванны определяется мощностью перемешивания, зависящей от расхода кислорода и продуктов обезуглероживания. Для 160-тонного конвертера расчетное значение модуля средней за продувку скорости

циркуляции ванны составило  $w = 1,53$  м/с, которое корреспондируется с данными других авторов [4]. При  $Re = wd/\vartheta = 1,53 \cdot 5 / (0,8 \cdot 10^{-6}) = 9,56 \cdot 10^6 \gg Re_{кр}$  – устанавливается развитый турбулентный режим течения. Здесь  $Re$  – критерий Рейнольдса, определяющий гидродинамический характер движения среды;  $d = 5$  – внутренний диаметр цилиндрической части футеровки конвертера, м (в числовом примере принято самое неблагоприятное граничное значение – для новой футеровки);  $\vartheta = 0,8 \cdot 10^{-6}$  кинематическая вязкость эмульгированной ванны [2], м<sup>2</sup>/с;  $Re_{кр} = 10^4$  – критическое значение критерия Рейнольдса.

При поступательной скорости рабочего тела, превышающей  $10^4$  м/с, молекулярным переносом можно пренебречь [10]. Поэтому процесс теплопереноса в ванне в основе своей имеет гидродинамическую природу. Теплофизические процессы, являющиеся следствием сопутствующего массообмена, аддитивно учитывают сопротивление каждой стадии. Кинетика процессов обработки лома и добавок сыпучих материалов определяется их охлаждающим воздействием. Автотермический разогрев в конвертере не может быть выше адиабатического, когда приход теплоты компенсируется потерями агрегата в окружающую среду.

Считаем, что все возмущающие воздействия по ходу продувки аддитивны по отношению друг к другу, а результирующее влияние в объекте от локальных возмущений определяется их линейной суперпозицией.

В соответствии с уравнениями (2) и (3) с учетом начальных условий получаем выражение переходного процесса для массовой доли окислившегося  $R$ -го элемента ванны по ходу продувки (4) и температуры ванны (5):

$$\Delta R = R_{\text{ч}} [1 - \exp \{-\tau / [\Omega_{\text{yRM}} H_{\text{э,м}}^{-1} (R_{\text{ч}} - \gamma R_{\text{м}})]\}], \quad (4)$$

где  $\Delta R = R_{\text{ч}} - R$  – массовая доля  $R$ -го элемента, окислившегося в момент  $\tau$ , %;  $R_{\text{ч}}, R_{\text{м}}$  – массовые доли  $R$ -го элемента в чугуна и металле, %;  $\Omega_{\text{yRM}}$  – удельное

значение емкостного сопротивления ванны при массообменном процессе окисления  $R$ -го элемента, мин/(м · %);  $H_{эм}$  – относительный коэффициент эффективного массопереноса в ванне,  $\gamma = 0,9$  – коэффициент, характеризующий угар элементов чугуна (равен отношению массы выплавляемого металла и исходной массы металлической ванны).

$$t_j = -t_{j*} \{1 - \exp [-(\tau - \tau_j)/(\Omega_{yj} H_T^{-1} m_j)]\}, \quad (5)$$

где  $t_{j*} = Q_j m_j / (0,95 c m_v)$  – установившееся состояние температуры, °С;  $\Omega_{yj}$  – удельное значение емкостного сопротивления ванны при теплообменном процессе разложения добавки  $j$ -го материала, мин/(м · т);  $Q_j$  – удельная теплота, затраченная на усвоение добавки  $j$ -го материала, которая равна для извести, известняка и плавикового шпата соответственно 2510, 4820 и 2330 кДж/т · 10<sup>3</sup> [9].

## Выводы

С использованием теории Д.А.Франк-Каменецкого исследован кислородно-конвертерный процесс. Получены уравнения переходных процессов выгорания примесей и изменения температуры ванны.

## Литература:

1. Глинков А.М. Тепловая работа сталеплавильных ванн. – М.: Металлургия, 1970. – 408 с.
2. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия, 1974. – 496 с.
3. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф.Чернега, В.С.Богушевський, Ю.Я.Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф.Чернеги, Ю.Я.Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
4. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів,

рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник. – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.

5. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 492 с.

6. Бигеев А.М. Metallургия стали. Теория и технология плавки стали. – Челябинск: Metallургия, 1988. – 480 с.

7. Шорин С.Н. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1964. – 490 с.

8. Выплавка кислородно-конвертерной стали с низким содержанием примесей /П.И.Югов, В.В.Поляков, В.В.Рябов и др.//Чер. металургия: Бюл. НТИ. – 1991. – № 6. С. 15 – 21.

9. Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. АСУТП производства стали в конвертерах. – К.: Техніка, 1991. – 180 с.

10. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. – К.: Донецк: Вища школа, 1986. – 280 с.