

ванного состояния, а также с кинетическими, физическими и активационными параметрами.

Знание величины энергоемкости позволяет производить расчеты новых энергетических критериев разрушения синергетики при произвольных сочетаниях силовых, временных, дефектных факторов и напряженно-деформированных состояниях, которые даны в работе [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скуднов В.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 4. С. 25 – 28.
2. Скуднов В.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1994 № 8. С. 42 – 44.
3. Скуднов В.А. Предельные пластические деформации металлов. – М.: Металлургия. 1989. – 187 с.
4. Жильмо Л. Характеристика свойств конструкционных сталей работой предельной деформации// Современные проблемы металлургии: Сб. научн. тр. ИМЕТ. – М.: АН СССР, 1957. С. 572 – 582.
5. Скуднов В.А. Синергетика явлений и процессов в металлургии, упрочняющих технологиях разрушения: Учеб. пособие – Нижний Новгород: НГТУ, 2011. – 198 с.
6. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 160 с.
7. Скуднов В.А., Богашов Ф.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1986. № 8. С. 48 – 53.

© 2013 г. В.А. Скуднов
Поступила 13 марта 2012 г.

УДК 669.14-154:669.0.94.3

Б.Н. О कोरोков

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЕННОГО ПРИНЦИПА ЛЕ-ШАТЕЛЬЕ-БРАУНА К ПРОЦЕССУ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА В КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЕ. ЧАСТЬ I. СТОХАСТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ГАРМОНИЧЕСКОГО РЯДА КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕРОДА И ПРИЧИНЫ ЕЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Аннотация. Установлена возможность оценивать степень аритмии процесса окисления углерода и вероятность возникновения выбросов количественно по дисперсии колебаний переменной составляющей скорости окисления углерода (ΔV_C) в период его интенсивного окисления. В этот период ΔV_C может рассматриваться как случайный слабоэргодический процесс. Такой подход позволил исследовать частотный ряд колебаний случайной составляющей ΔV_C . Он представляет собой практически непрерывную последовательность частот (от kHz/с до kHz/мин), обусловленных структурными составляющими самого технологического процесса.

EXPANDED LE-SHATELLIE-BROWN PRINCIPLE APPLICATION TO CARBON OXIDATION PROCESS IN LD BATH PART I. THE STOCHASTIC STRUCTURE OF THE HARMONIC SERIES OF OSCILLATIONS VARIABLE COMPONENT OF CARBON OXIDATION AND CAUSES ITS OCCURRENCE

Abstract. The possibility was identified to quantify the degree of V_C arrhythmia and converter emissions probability based on the dispersion of variable component of the velocity of carbon oxidation fluctuations (hereinafter ΔV_C) during the period of its intensive oxidation. During the period of carbon intensive oxidation, ΔV_C can be viewed as weakly ergodic random sub-process. This approach allowed for studying of the ΔV_C oscillations frequency range. This range represents practically continuous sequence of frequencies (from kHz/sec to kHz/min), which sequence is determined by structural components of oxygen furnace process.

Главенствующая роль реакции окисления углерода в сталеплавильных процессах металлургами подчеркивалась всегда, и ей уделялось основное внимание. Это вполне справедливо, так как она обладает целым рядом уникальных свойств. Она единственная имеет газообразные продукты окисления и поэтому они покидают взаимодействующие фазы, не накапливаясь в системе. Это в свою очередь гарантирует реакцию от возможного насыщения и затухания до практически полного исчезновения углерода

в системе. Наконец, газообразные продукты реакции, покидая взаимодействующие фазы, их перемешивают и ускоряют сами процессы взаимодействия. Налицо процесс с положительной обратной связью, что должно порождать неустойчивость и колебательность процесса.

Поэтому уточнение понимания природы этого явления и установление технологических факторов, определяющих его динамику, являются естественным предметом данной работы.

В шестидесятых годах прошлого столетия автором представленной работы и В.И. Явойским были впервые сформулированы основные положения о подъеме уровня ванны в кислородных конвертерах [1, 2]. Впоследствии было установлено, что основной причиной возникновения выбросов и потери управления процессом является подъем уровня ванны и динамика изменения скорости окисления углерода при его интенсивном окислении [3].

Таким образом, можно было констатировать, что для возникновения выбросов шлакометаллической эмульсии необходимым условием является достижение определенного уровня подъема ванны, который определяется в первую очередь конструкцией агрегата.

К достаточным условиям относится превышение определенной скорости нарастания процесса формирования оксидов углерода, т. е.

$$\left(\frac{\Delta V_C}{\Delta t} \right) > M, \quad (1)$$

где ΔV_C – изменение скорости окисления углерода, кг/с за отрезок времени Δt , с.

Все плавки условно были разделены на «ровные» и «аритмичные» (рис. 1, 2). Например, для условий работы 280-т конвертеров (интенсивность продувки 3,0 – 3,5 м³/(т·мин), передельный чугун) к «ровным» были отнесены плавки, на которых во втором периоде

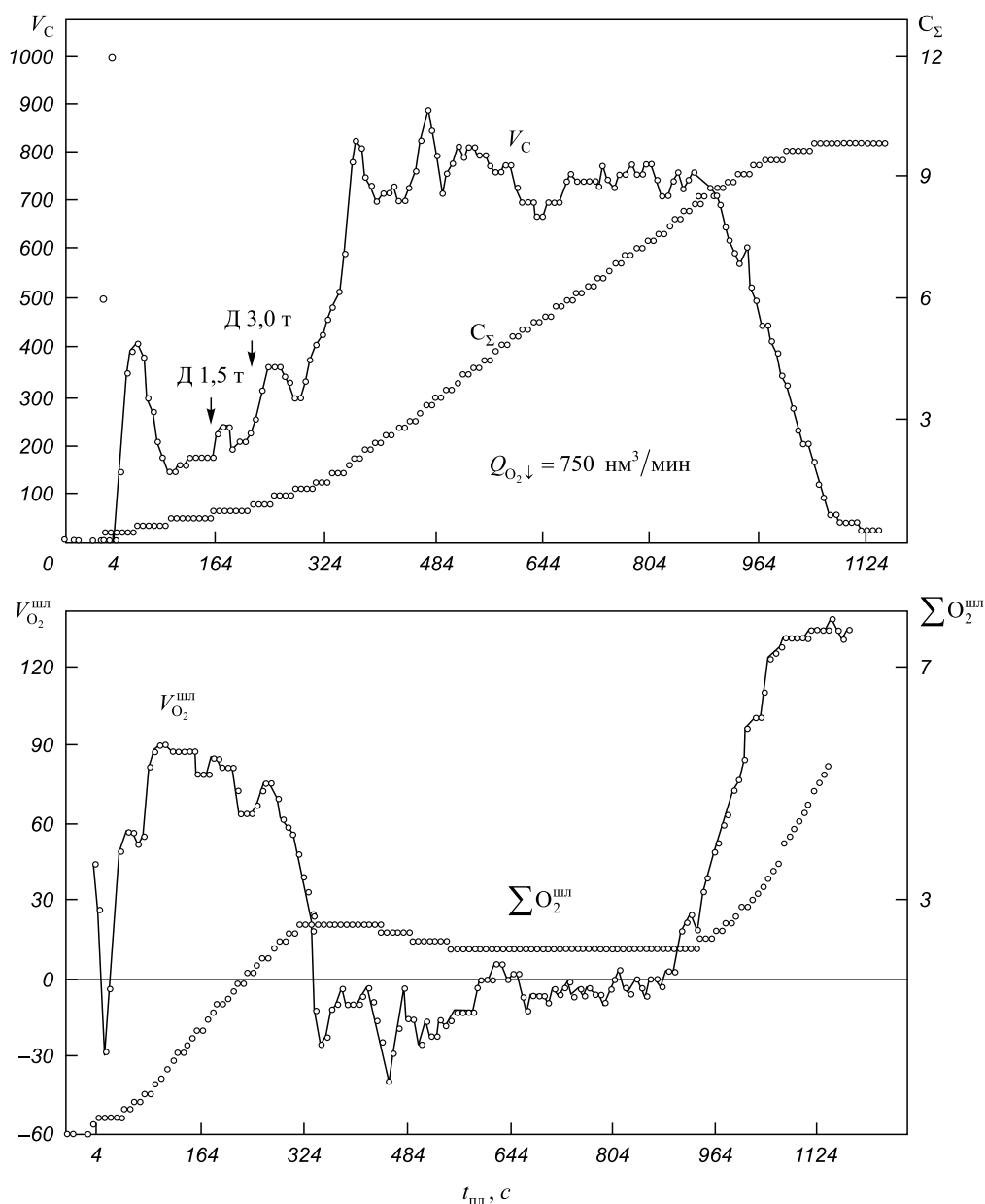


Рис. 1. Пример «ровной» плавки (№ 97):

V_C – скорость окисления углерода, кг/мин; C_Σ – общее количество окислившегося углерода, т; $V_{O_2}^{шл}$ – скорость накопления кислорода продувки в шлаке, $\text{кг/мин} \cdot 10^{-1}$; $\Sigma O_2^{шл}$ – общее количество кислорода продувки, накопленное в шлаке, т; Д 1,5 т, Д 3,0 т – добавка извести, т; $Q_{O_2 \downarrow}$ – средняя интенсивность продувки кислородом, $\text{нм}^3/\text{мин}$

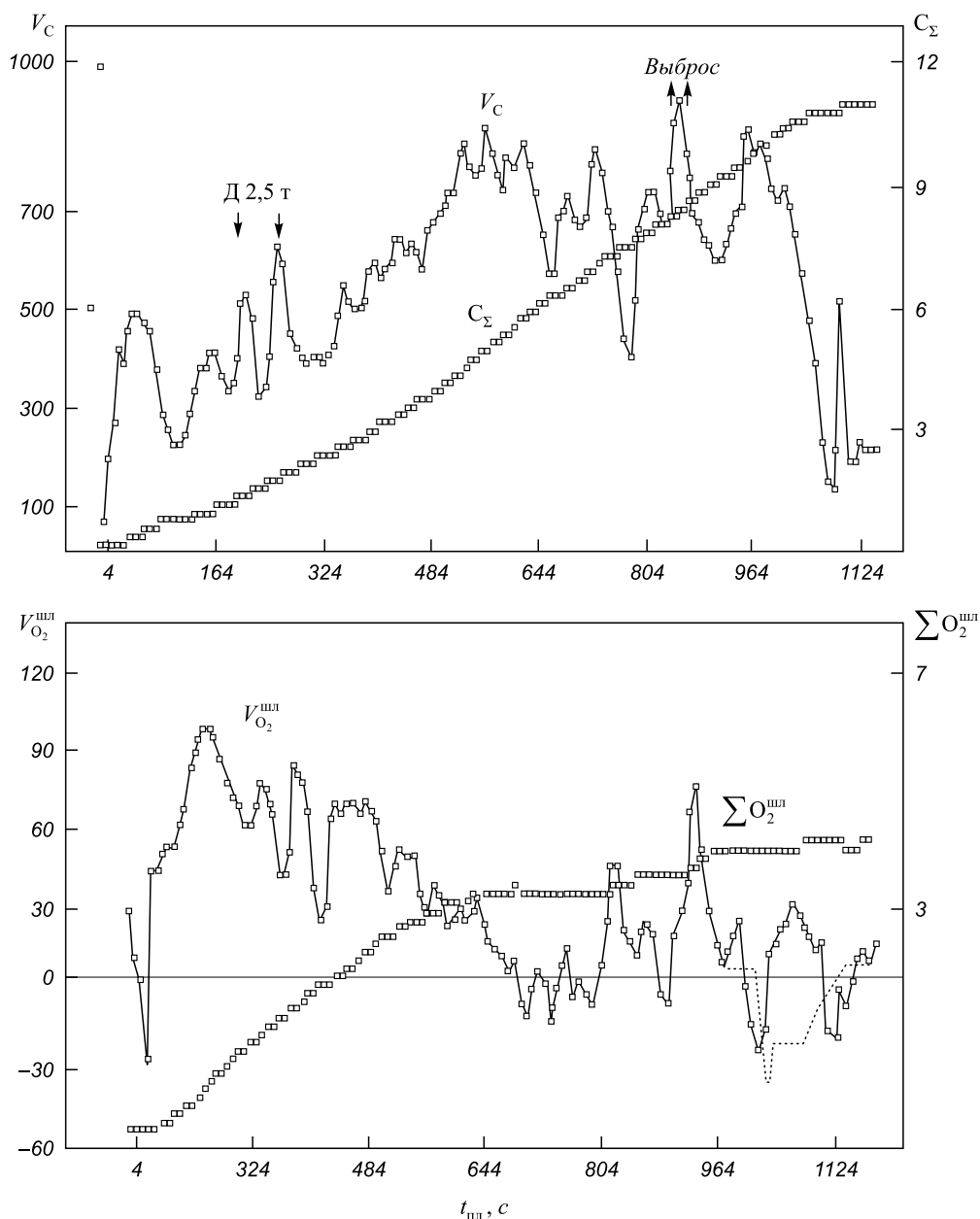


Рис. 2. Пример аритмичной плавки (№ 107):

V_C – скорость окисления углерода, кг/мин; C_Σ – общее количество окислившегося углерода, т; $V_{O_2}^{\text{пл}}$ – скорость накопления кислорода продувки в шлаке, $\text{кг/мин} \cdot 10^{-1}$; $\Sigma O_2^{\text{пл}}$ – общее количество кислорода продувки, накопленное в шлаке, т

процесса продувки (период интенсивного окисления углерода) не наблюдалось ускорение процесса образования оксидов углерода ($\Delta V_C / \Delta t$) более $0,18 \text{ кг/с}^2$ при неизменном положении фурмы (H_ϕ) и расходе кислорода продувки (V_{O_2}). К «аритмичным» были отнесены плавки, на которых во втором периоде продувки наблюдалось ускорение процесса образования оксидов углерода с величинами, равными или превосходящими $0,18 \text{ кг/с}^2$ (рис. 3). Эти результаты были интересны и имели некоторое практическое значение. Однако отсутствие соответствующего аппарата критериальной оценки динамики окисления углерода существенно снижало их практическую ценность, так как не было ответа на вопрос – «Как исключить эти кризисные ситуации?»

В рамках данной работы этот вопрос решен следующим образом. Процесс окисления углерода во втором периоде продувки представлен в виде двух составляющих – постоянной и переменной. В качестве признака начала и окончания второго периода плавки взята величина коэффициента использования кислорода на окисление углерода. Принято, что во втором периоде коэффициент отношения скорости подачи кислорода, израсходованного на окисление углерода, к расходу кислорода продувки, подаваемого на продувку $\eta_{O_2 \rightarrow [C]} \geq 0,75 \div 0,80$. Постоянная составляющая скорости окисления углерода во втором периоде продувки зависит от целого ряда факторов, главным из которых является интенсивность подачи кислорода [4 – 6].

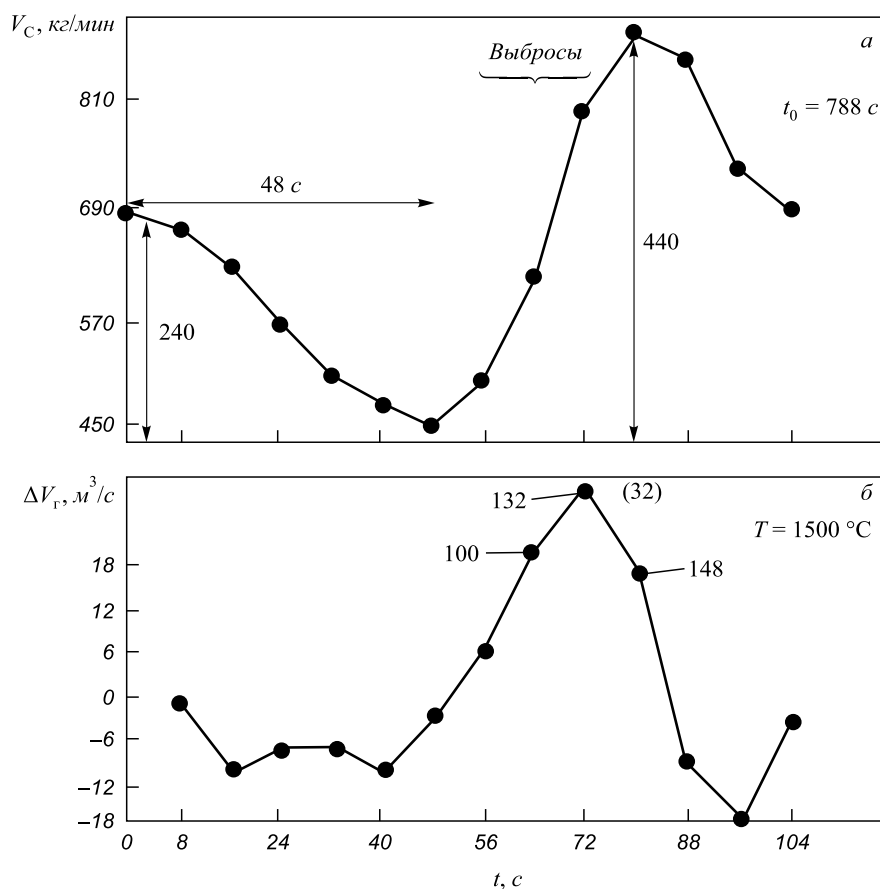


Рис. 3. Динамика изменения скорости окисления углерода (а) и объема газов (б), выделяющихся из конвертерной ванны при выбросах

Наблюдения за отдельными реализациями переменной составляющей скорости окисления углерода (ΔV_C) показали, что они не воспроизводятся от реализации к реализации, но амплитуда колебаний ΔV_C лежит в ограниченной, вполне определенной области значений (рис. 4).

Это послужило основанием к предположению о случайности процесса колебаний переменной составляющей скорости окисления углерода [6, 7]. Наибольший интерес для рассматриваемого случая представляли два свойства случайных процессов – стационарность и эргодичность [8]. Этот вопрос уже рассматривался Сургучевым Г.Д. в начале семидесятых годов прошлого столетия [9]. На основании анализа траектории скорости окисления углерода с позиций случайного процесса им был сделан вывод о том, что эти траектории не являются стационарными случайными функциями. Поэтому для получения стохастических характеристик такого процесса необходима обработка экспериментальных данных по множеству реализаций. Вывод Сургучева Г.Д. был абсолютно правильным, но относился к анализу реализаций V_C по всей длительности процесса продувки, без разделения на отдельные периоды и выделения постоянной составляющей.

Доказательством стационарности процесса окисления углерода во втором периоде служит независимость первого и второго моментов распределений случайного процесса от времени [10]. При этом стохастические ха-

рактеристики – математическое ожидание и дисперсия не существенно меняются от интервала к интервалу одной реализации. Проверка стационарности процесса осуществлялась по следующим правилам [10]:

- реализации V_C во втором периоде продувки с постоянным расходом кислорода (рис. 4, б) разбивались на равные интервалы длительности (≥ 1 мин), при которых изменения реализаций можно принять независимыми друг от друга, так как они превышают длительность возможных переходных процессов;
- на каждом интервале вычислялись первый и второй моменты распределения колебаний ΔV_C и их автокорреляционных функций;
- рассчитанные стохастические характеристики конкретной реализации по интервалам анализировались на наличие трендов и отклонений, превышающих ожидаемые величины, обусловленные выборочной изменчивостью.

Оценки стохастических характеристик, упомянутых выше, автокорреляционных функций и спектральных характеристик выполнены при непосредственном участии в этих работах Данченкова Я.В. и Зимина В.Ю. [11, 12]. Проверка на стационарность и эргодичность показала, что переменную составляющую скорости окисления углерода, отцентрированную по ее постоянной составляющей, во втором периоде продувки можно

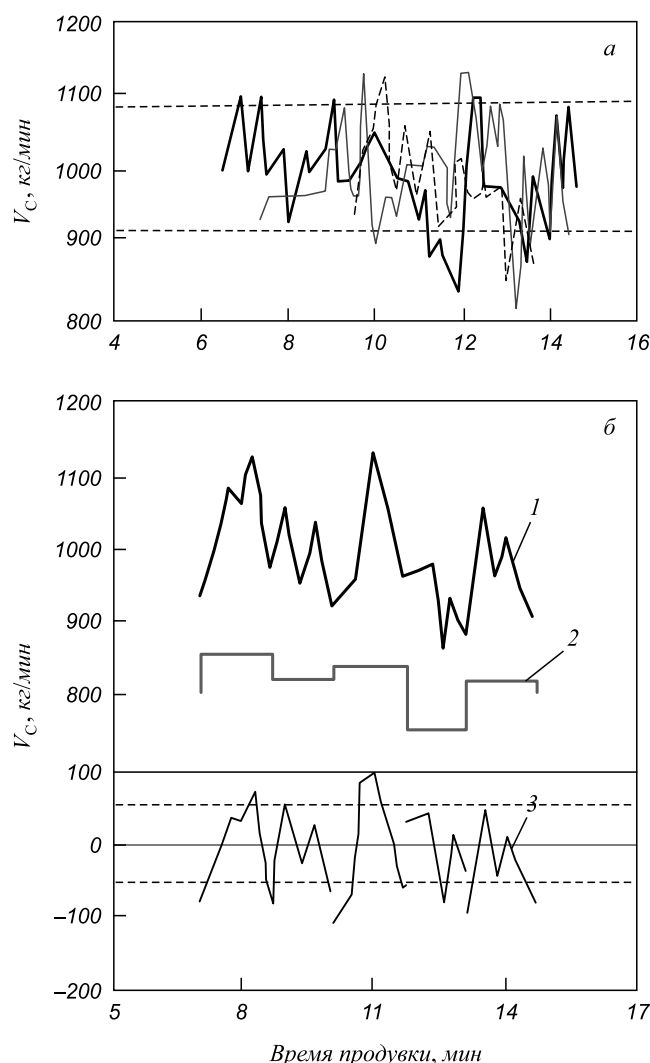


Рис. 4. Проверка стационарности переменной составляющей скорости окисления углерода (V_C) во втором периоде конвертерной плавки:

а – общая картина изменения V_C на нескольких плавках подряд;
б – изменение V_C (1) и ΔV_C (3) параллельно с изменением V_{O_2} (2)
 ---- – предел изменения V_C и ΔV_C

рассматривать как стационарный, слабоэргодический случайный процесс.

Такой вывод позволил исследовать переменную составляющую скорости окисления углерода с помощью математического анализа стационарных, эргодических случайных процессов по каждой отдельной реализации [8, 10] (рис. 5).

Это в свою очередь дало возможность рассчитать автокорреляционную функцию каждой реализации, получить уравнение ее спектральной плотности, оценить распределение мощности колебаний переменной части скорости окисления углерода по гармоническим составляющим, оценить их состав и установить связи с пространственной структурой процесса.

На рис. 5 приведены примеры изменения автокорреляционных функций переменной составляющей скорости окисления углерода в зависимости от

сдвига по времени для конвертеров вместимости 280 – 320 т.

Анализ вида множества автокорреляционных функций отдельных реализаций по плавкам показал, что они не связаны ни с вместимостью агрегатов, ни с особенностями передела. Главным и определяющим является сам процесс и характер его протекания. Для аритмичных плавков характерно большее значение $R_{\Delta V_C}(0)$, особенно это касается плавков, на которых были отмечены выбросы шлако-металлической эмульсии (см. рис. 5). Смена знака значений автокорреляционных функций говорит о наличии колебательных составляющих в исследуемой реализации ΔV_C . Гармонические составляющие не отличаются большой мощностью, которая обычно присуща детерминированным колебаниям. Это еще раз подтверждает стохастическую природу ΔV_C . Наиболее доступным и характерным показателем автокорреляционной функции является ее значение при сдвиге по времени, равном нулю. Это значение является дисперсией колебаний случайного стационарного процесса с математическим ожиданием, равным $R_{\Delta V_C}(0)$. Дисперсия колебаний ΔV_C – это фактически аритмия процесса, оцененная количественно. Связь аритмии процесса окисления углерода, как было показано выше, с технологическими характеристиками процесса полностью подтвердилась. Появилась возможность оценить эту связь не только качественно, но и количественно.

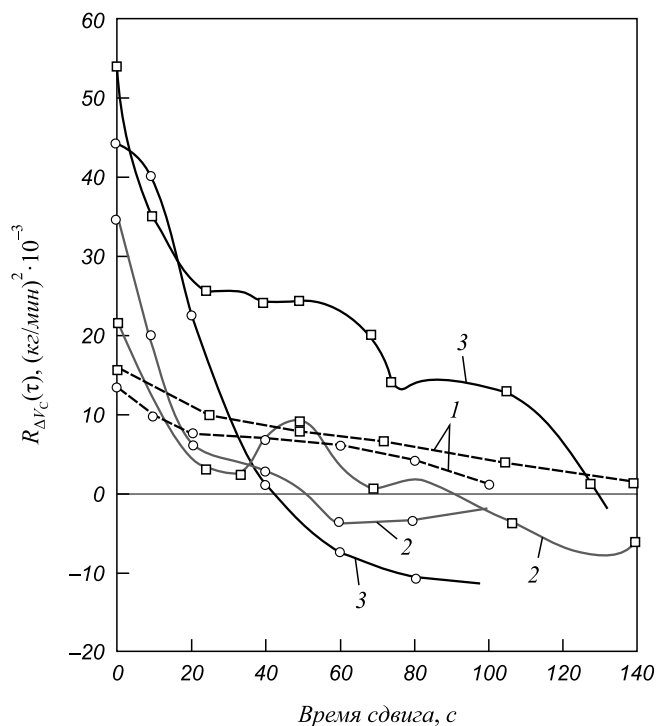


Рис. 5. Автокорреляционные функции переменной составляющей скорости окисления углерода во втором периоде продувки:
 1 – плавки первой группы (ровные);
 2 – плавки второй группы (аритмичные);
 3 – плавки второй группы с зафиксированными выбросами;
 ○ – 280 т; □ – 320 т

Установлена достаточно тесная статистическая связь между массой попадающего кремния, марганца и фосфора в агрегат с заливаемым чугуном и дисперсией колебаний переменной составляющей V_C во втором периоде продувки (рис. 6) для условий агрегата садкой 280 т:

$$R_{\Delta V_C}(O) = -14 \cdot 10^3 + 11,5 \cdot 10^3 \cdot G(\text{Si, Mn, P})_q, \quad (2)$$

где $G(\text{Si, Mn, P})_q$ – масса [Si], [Mn], [P], поступающих в конвертер с чугуном, т при $R = 0,37$ и $S_{\text{ост}} = 12,5 \cdot 10^3$.

Для агрегатов садкой 320 т эти исследования дали еще более убедительные результаты по наличию стохастических зависимостей между дисперсией колебаний V_C во втором периоде продувки и технологическими характеристиками процесса (табл. 1). Все эти характеристики непосредственно влияют на условия формирования шлаковой фазы и в первую очередь на массу образующихся оксидов железа [11].

Наличие методики оценки количества накопленного в шлаке окисленного железа позволила исследовать взаимосвязь значений этой величины в конце первого периода с дисперсией колебаний V_C во втором периоде продувки для большегрузных конвертеров. Представленные данные, весьма близкие по характеру, были аппроксимированы соответствующими регрессионными уравнениями.

Для 320-т конвертера:

$$R_{\Delta V_C}(O) = 10,44 \cdot 10^5 - 33,6 \cdot 10^4 G_{\Sigma \text{Fe}_{\text{шл}}} + 14,4 \cdot 10^3 G_{\Sigma \text{Fe}_{\text{шл}}}, \quad R = 0,75, \quad S_{\text{ост}} = 4,2 \cdot 10^3; \quad (3)$$

Для 280-т конвертера:

$$R_{\Delta V_C}(O) = -14 \cdot 10^3 + 6,66 \cdot 10^3 G_{\Sigma \text{Fe}_{\text{шл}}}, \quad R = 0,83, \quad S_{\text{ост}} = 5,95 \cdot 10^3, \quad (4)$$

где $G_{\Sigma \text{Fe}_{\text{шл}}}$ – масса суммарного железа в шлаке по окончании первого периода продувки, т.

Некоторое расхождение данных следует объяснять наличием систематических погрешностей в расчетах. Близость полученных зависимостей следует объяснять близкими емкостями агрегатов и тем, что дисперсии колебаний переменной составляющей скорости окисления углерода во втором периоде продувки действительно зависят от уровня накопленных оксидов железа в шлаке перед началом этого периода. Таким образом, был найден объективный критерий оценки аритмии протекания процессов окисления углерода, который может быть и критерием вероятности возникновения выбросов. Последнее верно благодаря тому, что выбросы наблюдали на плавках, на которых величина дисперсии превосходила определенное значение (рис. 7). Оба эти фактора определяются в первую очередь и главным образом количеством оксидов железа,

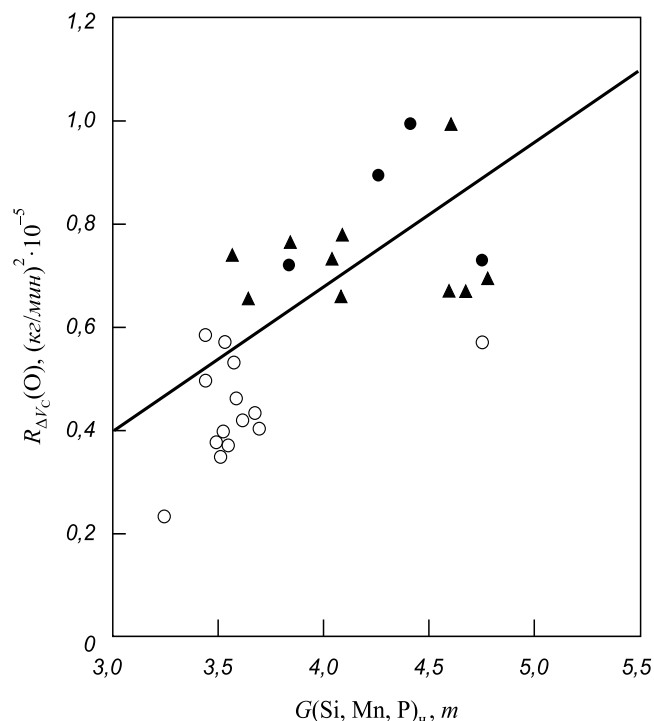


Рис. 6. Влияние суммарного количества кремния, марганца, фосфора, попадающих в конвертер с чугуном, на дисперсию колебаний скорости окисления углерода во втором периоде продувки (280-т конвертер):
○ – ровные плавки; ▲ – аритмические плавки;
● – плавки с выбросами

накопленных в шлаке перед началом периода интенсивного окисления углерода [6, 7].

Оценка распределения мощности колебательного процесса по спектру позволила выделить мощности сигналов в отдельной полосе частот и убедиться, что в принципе изменение мощности сигнала на отдельных интервалах спектра связана с технологическими переменными процесса.

Наличие селективных связей спектра колебаний ΔV_C с технологическими переменными процесса уже не вызывало сомнений, но требовало более убедительных и корректных доказательств. Для этих целей был использован метод авторегрессии, который применим к случайным стационарным, эргодическим процессам [10, 13].

В результате были получены [13] стохастические структуры реализаций переменной составляющей скорости окисления углерода общего решения уравнения авторегрессии в виде гармонического ряда:

$$\Delta V_C(K) = \sum_{i=1}^N A_i r_i^{|K|} \cos(f_i K + \varphi_i), \quad (5)$$

где A_i – амплитуда i -ой гармоники; f_i – частота колебаний i -ой гармоники; φ_i – сдвиг фазы i -ой гармоники; N – число гармоник, $N \leq n$; n – число разбиений исследуемого интервала изменений ΔV_C .

Таблица 1

Стохастические зависимости дисперсии переменной составляющей скорости окисления углерода от технологических факторов процесса

Функция	Регрессионное уравнение	Коэффициент корреляции
$R_{\Delta V_C}(0) = f(\bar{V}_C)$	$R_{\Delta V_C}(0) = 43,38(\bar{V}_C) - 21\,700$ $R_{\Delta V_C}(0) = 2,82 \cdot 10^{-4}(\bar{V}_C)^{2,6}$	0,64 0,78 ^{экс.}
$R_{\Delta V_C}(0) = f(\bar{V}_{O_2})$	$R_{\Delta V_C}(0) = 130,875(\bar{V}_{O_2}) - 111\,726$ $R_{\Delta V_C}(0) = 1,132 \cdot 10^{-14}(\bar{V}_{O_2})^{6,326}$	0,72 0,8 ^{экс.}
$R_{\Delta V_C}(0) = \sum \text{Пр}$	$R_{\Delta V_C}(0) = -44\,790 \cdot \sum \text{Пр} + 91\,338$	-0,64
$R_{\Delta V_C}(0) = f(T_q)$	$R_{\Delta V_C}(0) = 1058 \cdot T_q - 1\,430\,610$	0,63
$\frac{R_{\Delta V_C}(0)}{\bar{V}_C^2} = \sum \text{Пр}$	$\frac{R_{\Delta V_C}(0)}{\bar{V}_C^2} = -0,44 \sum \text{Пр} + 0,094$	-0,68
$\frac{R_{\Delta V_C}(0)}{\bar{V}_C^2} = f(t_q)$	$\frac{R_{\Delta V_C}(0)}{\bar{V}_C^2} = 0,0008 \cdot t_q - 1,06$	0,66
$\frac{R_{\Delta V_C}(0)}{\bar{V}_{O_2}^2} = \sum \text{Пр}$	$\frac{R_{\Delta V_C}(0)}{\bar{V}_{O_2}^2} = -0,048 \sum \text{Пр} + 0,097$	-0,81
$\frac{R_{\Delta V_C}(0)}{\bar{V}_{O_2}^2} = f(t_q)$	$\frac{R_{\Delta V_C}(0)}{\bar{V}_{O_2}^2} = 0,00072 \cdot t_q - 0,97$	0,67

Примечание: \bar{V}_C – средняя скорость окисления углерода во втором периоде процесса, кг/мин.

\bar{V}_{O_2} – средняя интенсивность подачи кислорода во втором периоде продувки, м³/мин.

$\sum \text{Пр}$ – содержание шлакообразующих примесей в заливаемом в агрегат чугуна (Si, Mn, P), %.

t_q – температура заливаемого чугуна, °C.

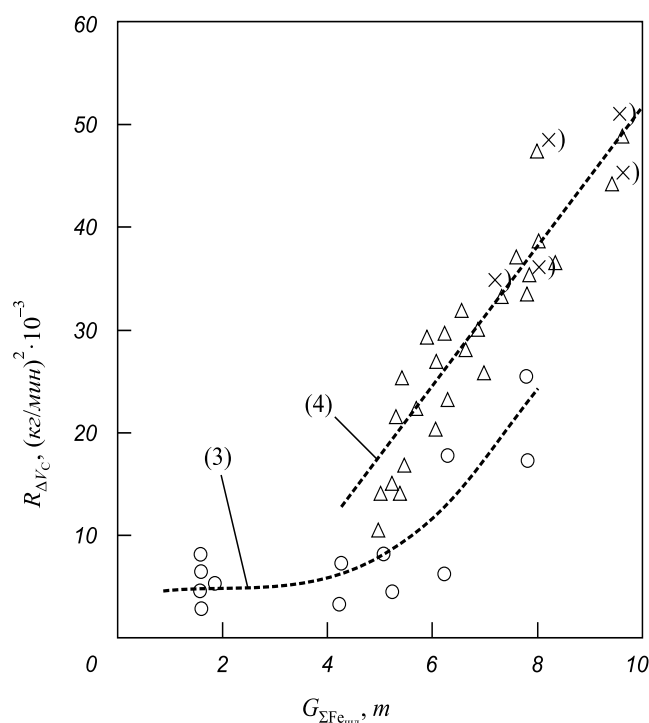


Рис. 7. Влияние массы окисленного железа, накопленного в шлаке за первый период продувки, на дисперсию колебаний скорости окисления углерода во втором периоде продувки:

Δ – 200 °C; \circ – 320 °C;

\times – с выбросами

Достоверность полученных стохастических структур реализаций переменной составляющей скорости окисления углерода подтверждена по ее воспроизведению при прогнозе значения ΔV_C с опережением до 36 с по найденным коэффициентам уравнения авторегрессии (5). Такая проверка показала, что при опережении прогноза до 36 с его среднеквадратическое отклонение от исследуемых реализаций не превышало погрешности определения V_C [13].

Исследования стохастической структуры реализаций ΔV_C показали присутствие в ней гармонических составляющих с пятью периодами. Периоды колебаний соответствующих структурных составляющих образуют непрерывный ряд: $T_1 > 1,2$ мин; $0,6 < T_2 \leq 1,2$ мин; $0,4 < T_3 \leq 0,6$ мин; $0,3 < T_4 \leq 0,4$ мин; $0,2 \leq T_5 \leq 0,3$ мин.

Присутствие низкочастотной составляющей и средних частот не было неожиданным, но позволило их существенно конкретизировать. Интересным фактом послужило установление наличия в процессе колебаний ΔV_C относительно высоких частот ($\omega_3 = 1/T_3 \div \omega_4 = 1/T_4$).

Еще более интересным оказалось распределение мощности структурных колебаний переменной составляющей V_C в зависимости от периода колебаний T (рис. 8), которое описывается регрессионным уравнением:

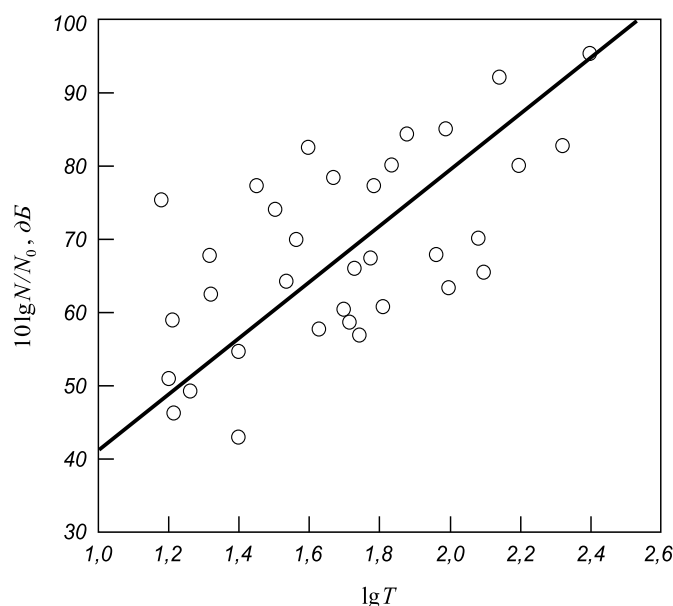


Рис. 8. Распределение мощности колебаний скорости окисления углерода по спектру их стохастической структуры, $N_0 = 1$ (кг/мин)²

$$10 \lg \frac{N}{N_0} = 1,1 + 40,25 \lg T \text{ при } R = 0,55 \text{ и } S_{\text{ост}} = 9,79, (6)$$

где $N_0 = 1$ (кг/мин)²; T – период колебаний, с.
Это уравнение отвечает простому соотношению:

$$A\omega^2 = 1, (7)$$

где A – амплитуда колебаний гармонической составляющей, кг/мин; ω – частота колебаний, Гц.

Уравнение (7) показывает, на сколько существенно должны отличаться мощности и амплитуды колебаний гармонических составляющих в зависимости от частоты.

Распределение мощности колебаний в зависимости от логарифма частоты (см. рис. 8) показывает, что она превышает утроенное значение остаточного среднеквадратического отклонения по аппроксимирующему уравнению (6). Поэтому количественного исследования связей параметров гармонических колебаний на частотах более ~0,04 Гц с технологическими характеристиками не производилось.

Со стороны низкочастотных составляющих область исследований так же была ограничена. Для надежного определения низкочастотных составляющих необходимо иметь длительность участка автокорреляционной функции не менее 1/4 длительности периода колебаний. С другой стороны, автокорреляционная функция надежно определена при величине сдвига менее 0,1 длительности всей исследуемой реализации [13]. В рамках данной работы максимальной достоверной величиной периода колебаний был принят интервал, равный 0,4 длительности второго периода продувки. Поэтому из

всего обнаруженного спектра, на связь с технологическими характеристиками процесса были исследованы первые три гармоники T_1 , T_2 и T_3 , при этом период первой гармоники был ограничен сверху величиной ~180 с. В табл. 2 представлены результаты этого анализа. Он показал, что спектральная структура колебаний ΔV_C имеет явно выраженную селективную связь по частотам с изменением технологических характеристик процесса. При этом структура спектра явно связана с пространственно-распределенной структурой конвертерного процесса.

Действительно, период низкочастотных составляющих колебаний ΔV_C при интенсивном окислении углерода ($72 < T_1 \leq 180$ с) определяется состоянием шлака (его массой, массой извести, отданной в агрегат, количеством шлакообразующих компонентов, поступивших с чугуном и, наконец, массой оксидов железа). Период этой составляющей не зависит от интенсивности продувки и положения фурмы (см. табл. 2).

Наибольший интерес представляет колебательный процесс окисления углерода с периодом $36 < T_2 \leq 72$ с. Он зависит в основном от изменения управляющих воздействий (изменения положения фурмы и расхода кислорода, массы загруженной извести в первом периоде).

Обращает на себя внимание особенно явное влияние положения фурмы, т.е. расположение реакционной зоны в ванне.

Связи указывают на то, что эта группа колебаний по своей природе в первую очередь относится к системе «шлак – металл». Именно колебания с периодом 36 – 72 с обуславливают ускорение скорости окисления углерода, имеющее прямое отношение к условиям возникновения выбросов шлака и металла [уравнение (1)].

Колебания ΔV_C с периодом $24 < T_3 \leq 36$ с связаны с интенсивностью подачи кислорода и изменением положения фурмы.

Влияние характеристик шлаковой фазы достоверно не установлено. Главенствующую роль по влиянию на период колебаний занимает положение фурмы и расход кислорода на продувку (см. табл. 2). Эта группа колебаний ΔV_C также имеет непосредственное отношение к условиям возникновения выбросов [уравнение (1)], хотя и в меньшей степени, чем предыдущая.

Характер обнаруженных связей позволяет заключить, что низкочастотные гармоники T_1 в основном определяются процессами, происходящими в шлаковой фазе. Гармонические составляющие с периодом T_2 определяются процессами, происходящими в шлакометаллической эмульсии системы шлак – металл. Гармонические составляющие с периодом T_3 обусловлены процессами, происходящими в металлической ванне. Наконец, качественный анализ связей гармонических составляющих в интервале $12 < T_4, T_5 \leq 24$ с с технологическими характеристиками процесса указывает на наличие подавляющего влияния только расхода кислорода и, следовательно, они обусловлены исключительно

Таблица 2

Результаты анализа влияния технологических характеристик процесса на периоды гармонических составляющих колебаний переменной составляющей скорости окисления углерода во втором периоде продувки

№ п/п	Взаимосвязь	Регрессионное уравнение	R	S _{ост.}
72 < T ₁ ≤ 180 с				
1	T ₁ = f(G _{изв})	T ₁ = 5,4 + 5,58(G _{изв})	0,53	26,4
2	T ₁ = f(∑Пр)*	T ₁ = 33,8 + 46,7(∑Пр)	0,41	31,2
3	T ₁ = f(G _{∑Feшл})	T ₁ = 78,6 + 5,3G _{∑Feшл}	0,46	25,8
4	T ₁ = f(G _{шл})	T ₁ = 68,2 + 1,56G _{шл}	0,4	31,8
5	T ₁ = f(V _{O₂})	T ₁ ≠ f(V _{O₂})	–	–
6	T ₁ = f(H _ф)	T ₁ ≠ f(H _ф)	–	–
7	T ₁ = f(V̄ _{C₂})	T ₁ ≠ f(V̄ _{C₂})	–	–
8	T ₁ = f(τ _{пер})	T ₁ ≠ f(τ _{пер})	–	–
36 < T ₂ ≤ 72 с				
1	T ₂ = f(H _ф)	T ₂ = –54,6 + 59H _ф	0,63	7,32
2	$\frac{T_2}{H_{cp}} = f(V_{O_2})$	$\frac{T_2}{H_{cp}} = 15 + 0,0128V_{O_2}$	0,34	3,96
3	$\frac{T_2}{H_{cp}} = f(G_{изв})$	$\frac{T_2}{H_{cp}} = 33,6 - 0,248G_{изв}$	–0,13	4,5
		$\frac{T_2}{H_{cp}} = 71,6 - 16,2G_{изв} + 1,26G_{изв}^2 - 0,0264G_{изв}^3$	0,52	3
4	$\frac{T_2}{H_{cp}} = f(\sum \text{Пр}^*)$	$\frac{T_2}{H_{cp}} \neq f(\sum \text{Пр})$	–	–
5	$\frac{T_2}{H_{cp}} = f(G_{\sum \text{Feшл}})$	$\frac{T_2}{H_{cp}} \neq f(G_{\sum \text{Feшл}})$	–	–
24 ≤ T ₂ ≤ 36 с				
1	T ₃ = f(V _{O₂})	T ₃ = 13,1 + 0,015V _{O₂}	0,47	2,4
2	T ₃ = f(H _{cp})	T ₃ = 19,7 + 5,46H _{cp}	0,12	2,8
3	T ₃ = f(G _{изв})	T ₃ ≠ f(G _{изв})	–	–
4	T ₃ = f(∑Пр)	T ₃ ≠ f(∑Пр)	–	–
5	T ₃ = f(G _{шл})	T ₃ ≠ f(G _{шл})	–	–
Пр* – масса загруженных в конвертер [Si], [P], [Mn] с чистым чугуном				

состоянием реакционной зоны. Подводя итоги этих исследований, можно прийти к следующим положениям.

Периодичность изменений скорости окисления углерода на низких частотах может вызываться: периодическим вводом шлакообразующих и твердых окислителей по ходу продувки, изменением физико-химических свойств шлаковой фазы, а следовательно, они взаимосвязаны с изменением уровня ванны [1]. Изменения переменной составляющей скорости окисления углерода на средних частотах T₂ и T₃ связаны в первую очередь с взаимодействием между шлаковой и металлической фазами и определяются интенсивностью и периодичностью перемешивания их структурных составляющих. Последние зависят от взаиморасположения дутьевых устройств и ванны и интенсивности подачи кислорода.

Высокочастотные составляющие T₄ и T₅ связаны с колебанием и периодическим движением зон взаимодействия окислительных газов с ванной, «реакционной зоной».

Выполненные исследования и результаты, полученные по колебательным процессам в «реакционной зоне» [14, 16], взаимодействии пульсирующих окислительных газовых потоков с каплями расплавов на основе железа [17, 18], применении пульсирующей продувки [16, 18] позволяют сформулировать качественный ряд гармонических составляющих колебания скорости окисления углерода в конвертерном процессе в зависимости от масштаба структур, его создающих (рис. 9). Разумеется, такое представление гармонического ряда носит определенный условный характер, особенно

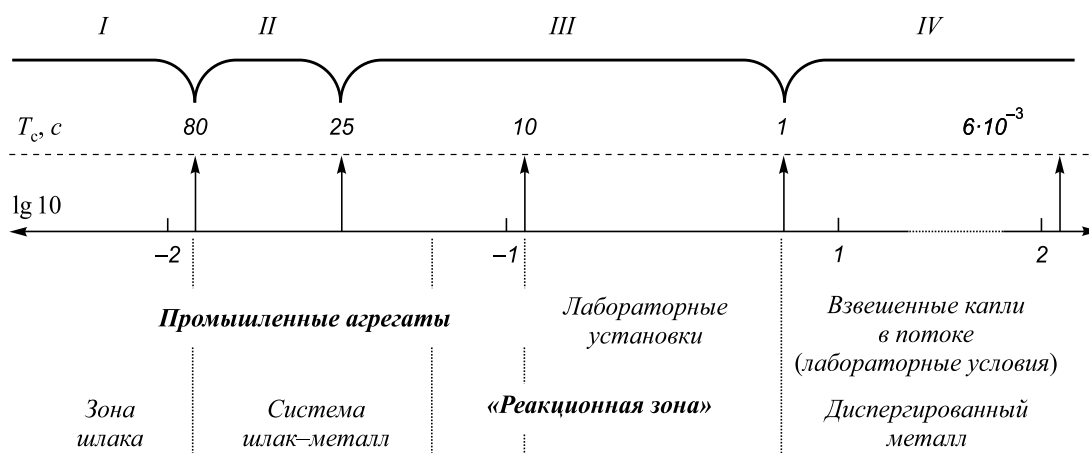


Рис. 9. Стохастический ряд гармонических составляющих колебаний скорости окисления углерода в конвертерном процессе в зависимости от масштаба структур, его составляющих:
 T_c – период колебаний

обозначенные границы между отдельными областями спектра. Однако такое представление позволяет наглядно изобразить всю картину в целом и понять, что природа колебаний скорости окисления углерода носит такой же многообразный спектр, как и ее стохастическая спектральная структура. В этом явлении принимает участие весь набор процессов, лежащих в диапазоне от макро процессов перемешивания взаимодействующих фаз до процессов на уровне взаимодействия диспергированных металлических капель ($0,1 - 0,05$ мм) с окислительной фазой [16, 18, 20, 21].

Диапазон частот оказывается весьма широк: от сотых и тысячных долей Гц до единиц и десятков кГц. Условно весь диапазон можно поделить на низкочастотную группу I, когда период колебаний приближается к 100 с и более, среднечастотную группу II с периодом колебаний в диапазоне 25 – 80 с, высокочастотную группу III с периодом колебаний в диапазоне 1 – 25 с и сверхвысокочастотную группу IV с периодом колебаний в диапазоне от 1 до тысячных и десятитысячных долей секунды.

Распределение мощности по спектру колебаний (см. рис. 8) указывает на возможное механическое влияние на протекание макроявлений конвертерного процесса (изменение уровня ванны, выбросы шлакометаллической эмульсии и др.) низко-, средне- и высокочастотных составляющих зон промышленных агрегатов (см. рис. 9). Их мощность составляет 4 – 6 % от средней мощности перемешивания ванны за счет образования в последней оксидов углерода и соответствует колебаниям V_c относительно средних значений до 20 – 25 %. Для сравнения (см. рис. 8), высокие частоты составляют менее 0,1 – 0,2 % средней мощности перемешивания ванны оксидами углерода и 0,3 – 0,45 % амплитуды колебаний V_c относительно ее средних значений. Низкочастотные составляющие ($T_1 \geq 80$ с), имеющие наибольшую мощность, обусловлены в первую очередь режимом ввода шлакообразующих и дру-

гих сыпучих по ходу продувки. Ввод сыпучих является необходимой технологической операцией и при грамотном ее выполнении она не приводит к нарушениям хода процесса. Саму низкочастотную составляющую колебаний нельзя в строгом смысле этого слова рассматривать как случайную, имеющую стохастическую природу, так как она в первую очередь обусловлена режимом ввода сыпучих.

Мощность колебаний на средних частотах снижается до 2 – 4 % средней мощности перемешивания ванны оксидами углерода, а мощность высокочастотной составляющей падает до долей процента. Однако природа этих колебаний, как отмечалось, связана с интенсивностью взаимодействия и перемешивания системы шлак – металл и процессами, происходящими в «реакционной зоне». Другими словами эти колебания непосредственно связаны с аэрометаллодинамикой ванны и физико-химическими процессами, происходящими в ней.

По мощности колебаний сверхвысокочастотные составляющие должны занимать исчезающе малые значения. Уникальность процессов окисления углерода заключается, как отмечалось выше, в том, что образующиеся газообразные продукты окисления перемешивают взаимодействующие фазы на любом уровне масштаба реагирующих структур. Такого рода системы обязательно порождают колебательные процессы, так как содержат в себе положительные обратные связи. Ансамбль таких структур порождает обязательное колебательное воздействие на структуры большего масштаба, которые на выходе порождают колебания уже большей мощности и т. д. Скорость окисления углерода можно рассматривать как сумму последовательно включенных стохастических, гармонических осцилляторов, каждый из которых обладает своим только ему присущими коэффициентом усиления и генератором случайных возмущений в последующей структуре.

Величины коэффициентов усиления определяются

масштабом структур, порождающих процесс, и в среднем подчиняются довольно простому закону постоянства произведения амплитуды колебаний на квадрат их частоты [уравнение (7)].

Генераторы случайных возмущений, если не подвержены специально организованным внешним воздействиям, генерируют возмущения естественным случайным образом. Ведущая частота возмущений соответствует ведущей частоте осциллятора, т. е. масштабу структуры, генерирующей процесс. Таким образом реализуется направленное воздействие высших частот на колебания ближайших низших с усилением мощности на каждом уровне благодаря источникам мощности, присущим каждой структурной составляющей процесса. На уровне диспергированных фаз это энергия струй окислителя, затраченная на формирование новой поверхности газ–металл, на уровне структур взаимодействия окислительных струй с ванной – энергия на образование кратера, перемешивание прилегающих фаз взаимодействия и др., на уровне структур взаимодействия шлак–металл – энергия перемешивания струями окислителей и образовавшимися оксидами углерода.

Поэтому за реализацию аритмии скорости окисления углерода ответственен в принципе весь ансамбль структур взаимодействия, присущих конвертерному процессу.

Вероятность возникновения аритмии окисления углерода определяется вероятностью генерации возмущений на каждом из уровней, при этом значимость возмущений тем больше, чем больше масштаб структур, их порождающих. Такие представления вполне объясняют положительное влияние на весь конвертерный процесс в целом пульсирующей продувки с частотами, измеряемыми килогерцами [18]. Речь идет об упорядочивании работы генераторов возмущений на уровне взаимодействия диспергированных фаз. Вопросы этих сверхвысокочастотных взаимодействий подробно изучались А.В. Явойским с сотрудниками [16–18]. Непосредственно за возникновение недопустимых изменений скоростей окисления углерода, приводящих к выбросам металла и шлака, ответственны средние и высокочастотные составляющие спектра – группы II и III структур взаимодействия промышленных агрегатов (см. рис. 9).

Поведение переменной составляющей скорости окисления углерода полностью оправдывает положение о стационарном неравновесном состоянии [19] динамической конвертерной системы, подверженной случайным возмущениям. При «ровных» плавках все величины затухания [уравнение (5)] r_i меньше нуля. Таким образом, вызванные флуктуации (возмущения) на отдельно

взятых гармониках быстро затухают, т.е. система самоорганизуется и оказывается устойчивой. На плавках «аритмичных» встречаются гармонические коэффициенты затухания больше нуля и система вся в целом оказывается неустойчивой, так как способности системы к саморегулированию оказываются недостаточными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Окорков Б.Н., Явойский В.И. Некоторые закономерности кислородно-конвертерного процесса. // Теория и технология новых процессов производства стали: Сб. МИСиС № 48. – М.: Металлургия, 1968. С. 166 – 175.
2. Окорков Б.Н. Некоторые оптические и физические свойства факела кислородно-конвертерного процесса и их связь с технологическими особенностями продувки. // Автореф. дис. на ... канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1967. – 14 с.
3. Абросимов А.Е., Окорков Б.Н. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1974. № 5. С. 180 – 185.
4. Явойский В.И. Теория процессов производства стали. – М.: Металлургия, 1963. – 830 с.
5. Автоматизация в черной металлургии. / Под ред. Д.И. Туркенича – М.: Металлургия, 1969. – 576 с.
6. Данченков Я.В., Окорков Б.Н. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1977. № 6. С. 33 – 38.
7. Зимин В.Ю., Окорков Б.Н., Явойский В.И. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1983. № 3. С. 26 – 30.
8. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
9. Сургучев Г.Д. Математическое моделирование сталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1978. – 224 с.
10. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1971. – 408 с.
11. Данченков Я.В. Исследования особенностей развития динамики шлакового режима и скорости окисления углерода и их связи с техническими параметрами кислородно-конвертерного процесса // Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1978. – 181 с.
12. Зимин В.Ю. Разработка способов управления процессами окисления углерода в конвертерной ванне // Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1982. – 177 с.
13. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его применение. – М.: Мир, 1971. Вып. 1. – 316 с.
14. Баптизманский В.И., Охотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. – Киев-Донецк: Вища школа, 1981. – 184 с.
15. Явойский А.В. Разработка, исследование и применения пульсирующего дутья в сталеплавильном производстве. // Дис. ... док. техн. наук. – М.: МИСиС, 1983. – 419 с.
16. Явойский В.И., Явойский А.В. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1976. № 7. С. 36 – 41.
17. Зимин В.Ю., Окорков Б.Н., Явойский В.И. и др. // Изв. АН СССР. Металлы. 1980. № 4. С. 3 – 9.
18. Явойский А.В., Сигачев А.А. и др. // Сталь. 1977. № 6. С. 49 – 50.
19. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. – М.: Мир, 2002. – 461 с.

© 2013 г. Б.Н. Окорков
Поступила 10 октября 2012 г.