

На данном этапе набор характеристик задается вручную, но планируется интегрировать его в автоматизированную систему классификации структур, описанную в работе [1]. Также планируется развитие алгоритма для его возможного использования при контроле соответствия зерновой структуры в задачах управления технологическими процессами изготовления материалов с заданными свойствами на мезо- и микроуровнях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шарыбин С.И., Ключев А.В., Столбов В.Ю. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 9. С. 49 – 53.

2. Мартюшев Н.В. // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5.
3. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение. – М.: Металлургия, 1983. – 384 с.
4. Лаборатория металлографии / Е.В. Панченко, Ю.А. Скаков, Б.И. Кример и др. – М.: Металлургия, 1965.
5. Металлография железа. Т. 1, 2. (с атласом микрофотографий). – М.: Металлургия, 1972. – 440 с.
6. Shih Frank. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. IEEE Press, 2010. – 537 p.
7. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. – М.: Вильямс, 2005. – 1296 с.

© 2013 г. С.И. Шарыбин., А.В. Ключев, В.Ю. Столбов  
Поступила 22 декабря 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 II

**Аннотация.** Наибольшее значение для практического управления конверторным процессом представляет частота колебания  $\Delta V_C$ , обусловленная процессами взаимодействия между кислородным факелом, шлаковой и металлической фазами в реакционной зоне. Это подтвердили эксперименты по изучению переходных процессов по каналам  $H_{\phi} \rightarrow \Delta V_C$ ,  $V_{O_2} \rightarrow V_C$  и шлакообразующие  $V_C$ . Канал  $V_{O_2} \rightarrow V_C$  четко реагирует на изменение расхода кислорода и скорость окисления углерода с динамическими характеристиками, обусловленными технологическими параметрами шлаковой фазы. Представлено теоретическое обоснование использования периодических воздействий по каналу «расход кислорода продувки – скорость окисления углерода». Предлагаемый метод управления продувкой позволяет полностью избавиться процесс от возникновения выбросов, улучшает процесс ассимиляции шлаковой фазой вредных примесей серы и фосфора, уменьшает потери металлической фазы, стабилизирует процесс продувки в целом. Результаты подтверждены промышленной эксплуатацией. Главной проблемой внедрения разработанного метода является обеспечение нормальной технической эксплуатации тракта отходящих газов (в первую очередь, системы регулирования объема отходящих газов).

## EXPANDED LE-SHATELLIE-BROWN PRINCIPLE APPLICATION TO CARBON OXIDATION PROCESS IN LD BATH. PART II

**Abstract.**  $\Delta V_C$  oscillation frequencies, caused by interaction processes between oxygen torch, slag and metallic phases in reaction zone, are of greatest importance for practical control over oxygen furnace process. This was proved in course of experiments to study the transient processes in  $H_{\phi} \rightarrow \Delta V_C$ ,  $V_{O_2} \rightarrow V_C$ , and slag-forming  $V_C$  channels.  $V_{O_2} \rightarrow V_C$  channel strictly reacts to oxygen consumption fluctuation and carbon oxidation velocity with dynamic characteristics, determined by technological parameters of the slag phase. The theoretical basis of use of periodic impacts in the channel “purging oxygen consumption – carbon oxidation velocity” channel is presented. Proposed purge management method allows to completely rid the process from emissions probability, improves the assimilation of sulfur and phosphorus contaminants in slag phase, decreases metallic phase losses, and stabilizes the purging process on the whole. The results are confirmed by industrial exploitation. The major issue of the designed method industrial application is to ensure normal technical operations of exhaust gases path (primarily, exhaust gases volume regulation system).

Сферой вмешательства в процесс через внешние воздействия были выбраны структуры средних частот колебания  $\Delta V_C$  системы «шлак – металл – реакционная зона (РЗ)» ([1], рис. 9).

Анализ переходных процессов по каналам «расход кислорода – скорость окисления углерода», «положение фурмы – скорость окисления углерода» и «присадка извести – скорость окисления углерода» показал правильность выбранного диапазона гармонических

колебаний спектра и позволил сделать заключение о том, что вмешательство наиболее эффективно на этих частотах по каналу «расход кислорода – скорость окисления углерода» [2, 3].

Этот канал позволяет непосредственно влиять на устанавливаемое в конвертерной ванне стационарное неравновесное состояние. Это состояние, как и равновесное для закрытой системы является асимптотически устойчивым [4 – 6]. Поэтому к нему применим

принцип Ле-Шателье, аналогично как и к закрытой равновесной системе. Следовательно организованные извне возмущения должны в системе вызвать соответствующие противодействия [6]. Это очень хорошо иллюстрируется результатами полученной зависимости ступенчатого изменения расхода кислорода продувки на изменение скорости окисления углерода и изменение скорости накопления кислорода продувки шлаком (рис. 1).

Эти кривые практически симметричны и прекрасно подтверждают применимость к конвертерной ванне принципа Ле-Шателье.

При изменении расхода кислорода его избыток поступает в ванну, а при его недостатке компенсируется потоком кислорода из ванны (см. рис. 1). Параметры экспериментального переходного процесса по каналу «расход кислорода – скорость окисления углерода» соответствуют средне- и высокочастотной составляющей стохастического гармонического ряда переменной составляющей скорости окисления углерода [1].

Не вдаваясь на данном этапе работы в детали схемы окисления углерода в конвертерной ванне, можно вполне обоснованно утверждать, что в период активного окисления углерода этот процесс происходит непосредственно в зоне взаимодействия окислительных струй с ванной (P3) и при взаимодействии углерода с оксидами шлака (главным образом оксидами железа) на границе металл–шлак. Поэтому рассматривать переходный процесс по каналу «расход кислорода – скорость окисления углерода» следует как результат совместного взаимодействия этих двух процессов.

Переходный процесс осложнен тем, что параллельно с изменением скорости окисления углерода, а следовательно и изменением доли кислорода, расходуемого на его окисление, происходит обмен потоков кислорода с ванной (шлаком). При скачкообразном увеличении

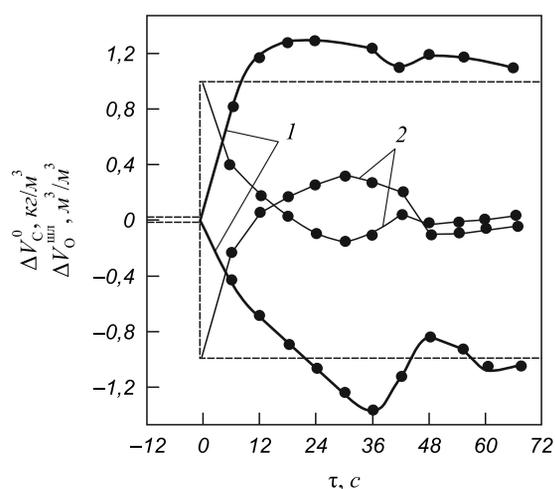


Рис. 1. Переходные процессы перераспределения кислорода на окисление углерода и в ванну при увеличении или снижении расхода кислорода:

1 – изменение скорости окисления углерода; 2 – изменение скорости накопления кислорода продувки ванны

расхода кислорода продувки его доля в потоке кислорода в ванну падает в течение определенного времени со 100 % практически до нуля (см. рис. 1). С уменьшением расхода кислорода ванна в первые моменты возмущения обеспечивает мало меняющуюся скорость окисления углерода кислородом на 100 %. Это положение компенсации разбаланса по кислороду сохраняется до тех пор, пока скорость окисления углерода не опустится до соответствия новому расходу кислорода продувки (см. рис. 1).

Само изучение переходных процессов осложнено тем, что система не находится в состоянии покоя при нанесении воздействий, а отсюда появление определенных искажений в реализуемых переходных процессах [7].

Поэтому к полученным результатам и выводам не следует предъявлять чрезмерные требования окончательности и детерминированности.

Полученные стохастические зависимости и оценки базируются на исходных массивах данных, имеющих в некоторых случаях большие методические погрешности при их идентификации в силу указанных выше причин.

Подробный анализ полученных переходных процессов (табл. 1) позволил прийти к следующим выводам. В 80 % случаев выполненных экспериментов канал управления «расход кислорода продувки – скорость окисления углерода» может быть аппроксимирован классическим колебательным звеном с передаточной функцией [8]:

$$W_{O_2 \rightarrow V_c}^{(P)} = \frac{K}{T^2 P^2 + 2T\xi(P+1)}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент усиления,  $\frac{\text{моль [C]}}{\text{моль [O}_2\text{]}}$ ;  $T$  – постоянная времени колебательного звена, с;  $\xi$  – относительный коэффициент затухания, с переходным процессом при ступенчатом единичном изменении входной величины [8]:

$$h_{O_2 \rightarrow V_c}(\tau) = K \left[ 1 - \frac{e^{-\gamma\tau}}{\sin \alpha} \sin(\omega\tau + \alpha) \right] 1(t), \quad (2)$$

где в соответствии со схемой рис. 2\*

$$\omega = \frac{2\pi}{T_1}; \quad \gamma = \frac{\omega}{\pi} \ln \frac{A_1}{A_2}; \quad \xi = \frac{\gamma}{\sqrt{\omega^2 + \gamma^2}}; \quad \sin \alpha = \xi.$$

Искомые параметры переходных процессов по средним значениям были получены следующими: коэффициент усиления  $K \cong 2,0 \frac{\text{моль [C]}}{\text{моль [O}_2\text{]}}$ ; постоянная времени колебательного звена  $T_1 \cong 25$  с; относительный коэффи-

\* Изменение системы идентификации параметров колебательного звена (рис. 2) по сравнению с классической [8] обусловлено слишком большими значениями коэффициентов затухания ( $\gamma$ ) и присутствием другой гармонической составляющей с периодом  $T_2$ , практически не связанной с рассматриваемым переходным процессом.

Таблица 1

Параметры переходного процесса по каналу «расход кислорода – скорость окисления углерода»

Номер	$A_1$ , МОЛЬ МОЛЬ	$A_2$ , МОЛЬ МОЛЬ	$T_1$ , с	$T_2$ , с	$\omega_1$ , рад с	$\omega_2$ , рад с	$\gamma$	$\xi$	$\alpha^1$ , °	$T_1^{*2}$ , с	$T_1+T_2$ , с	$T_{ан}$ , с	$T_{ан}^{*3}$ , с
1	2,000	0,250	28,8	21,6	0,218	0,291	0,144	0,562	33,5	23,8	45,4	8	8
2	2,000	0,295	44,0	24,0	0,143	0,262	0,087	0,52	31,3	36,1	50,1	18,2	18,2
3	1,750	0,150	27,4	20,6	0,229	0,305	0,179	0,616	38,0	23,0	43,6	9,8	8,6
4	1,750	0,250	25,2	21,6	0,249	0,291	0,154	0,526	31,7	20,8	42,4	11,4	9,97
6	1,885	0,350	36,24	15,6	0,173	0,403	0,093	0,472	28,2	29,5	45,1	22,5	21,2
7	1,475	0,525	37,2	20,4	0,169	0,308	0,055	0,312	18,2	29,4	49,8	17,2	12,7
8	2,500	0,250	35,2	12,0	0,178	0,524	0,131	0,591	36,2	29,35	41,35	12,6	15,75
9	2,250	0,350	19,2	12,0	0,327	0,524	0,194	0,510	30,6	15,74	27,74	10,7	12,04
10	1,395	0,600	25,2	18,9	0,249	0,3324	0,067	0,259	15,0	19,7	38,6	18,5	12,9
11	1,600	0,250	28,8	13,2	0,218	0,476	0,129	0,509	30,6	23,6	36,8	10,5	8,4
12	1,410	0,700	21,2	15,9	0,296	0,395	0,066	0,256	14,8	16,6	32,5	8	5,64
14	1,600	0,250	37,6	13,3	0,167	0,472	0,099	0,508	30,5	30,8	44,1	27,4	21,92
15	1,400	0,600	27,6	13,5	0,228	0,465	0,061	0,260	16,3	21,6	35,1	6,7	4,69
16	2,110	0,120	28,8	10,2	0,218	0,616	0,199	0,674	42,4	24,5	36,7	16,5	17,4
17	1,925	0,350	44,0	22,8	0,143	0,275	0,077	0,477	28,5	35,8	48,6	26,6	25,6
19	1,875	0,395	22,24	8,7	0,282	0,722	0,140	0,444	26,4	18	26,7	18,5	17,34
22	1,845	0,275	21,6	17,34	0,291	0,362	0,176	0,517	31,12	17,7	35,04	7,3	6,73
23	2,300	0,150	20,8	11,7	0,302	0,537	0,262	0,656	41	17,6	29,3	9,6	11,04
24	1,725	0,260	25,18	16,02	0,249	0,392	0,150	0,516	31,06	20,7	36,72	12,8	11,04
25	1,945	0,150	31,2	33,0	0,201	0,190	0,164	0,632	39,2	26,26	59,3	18,5	18,0
26	1,710	0,500	56,0	29,0	0,112	0,153	0,044	0,364	21,4	38,6	67,7	6	5,13
27	1,700	0,750	20,0	16,2	0,314	0,388	0,082	0,252	14,6	15,6	31,8	11	9,35
28	1,445	0,150	26,0	24,0	0,242	0,262	0,174	0,585	35,8	21,6	45,6	12	8,7
29	1,925	0,135	21,4	10,4	0,294	0,604	0,248	0,646	40,2	18,1	28,6	8,7	8,37
30	2,000	0,100	28,0	19,8	0,224	0,317	0,214	0,684	43,1	23,8	43,6	9,4	9,4
31	1,950	0,050	34,4	16,32	0,183	0,385	0,213	0,759	49,4	29,9	46,22	12	11,7
32	1,800	0,010	43,2	11,4	0,145	0,551	0,161	0,743	48	37,4	48,8	13,3	12,0
36	1,925	0,100	42,5	20,1	0,148	0,312	0,139	0,6855	43,3	36,2	56,3	15,5	14,9
37	2,475	0,245	36,0	25,5	0,174	0,246	0,128	0,5928	36,3	30,0	55,5	10,4	12,9
Среднее значение	1,850	0,295	30,9	16,8	0,203	0,374	0,151	0,52	31,2	25,2	42	13,42	12,4

$$\alpha^1 = \arcsin \xi; T_1^{*2} = T_1 \frac{3}{4} \cdot \frac{360}{360 - \alpha}; T_{ан}^{*3} = T_{ан} \frac{A_1}{2}$$

коэффициент затухания  $\xi \cong 0,52$ , коэффициент затухания экспоненты (см. рис. 2)  $\gamma \cong 0,151$  (см. табл. 1).

Постоянная времени колебательного звена  $T_1$ , определенная по схеме рис. 2, была скорректирована по найденному сдвигу по фазе  $\alpha$  (табл. 1). Это привело в отдельных случаях к существенной коррекции значения  $T_1$ . Так как дальнейшая коррекция с изменением  $T_1$  значений  $\xi$  и  $\alpha$  составила менее 5 %, то их значения не корректировались. В табл. 1 представлены результаты выполненных расчетов. Скорректированное значение  $T_1$  обозначено тем же символом, но со звездой ( $T_1^*$ ).

На рис. 3 приведен пример аппроксимации (кривая 3) переходного колебательного процесса изменения скорости окисления углерода  $[h_{O_2 \rightarrow r_C}(\tau)]$  уравнением (2). Подобная аппроксимация имевшихся в распоряжении экспериментальных реализаций показала, что вполне удовлетворительно это удается сделать только включая первый максимум на кривой переходного процесса. Последующие изменения  $V_C$  всегда являются колебаниями незатухающими небольшой мощности с периодом  $T_2$ . Они присутствуют на всех реализациях и не связаны непосредственно с

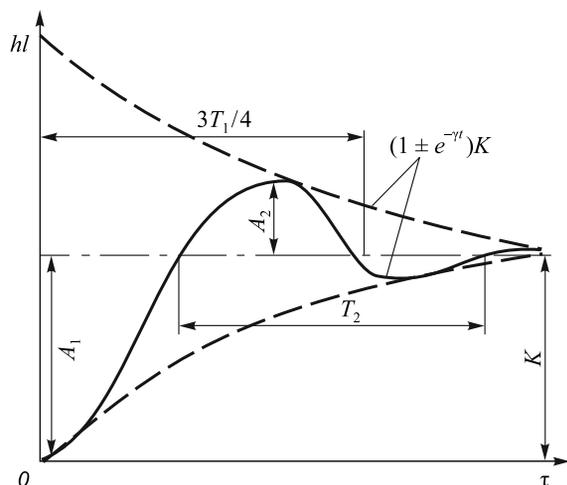


Рис. 2. Временная характеристика переходного процесса колебательного звена

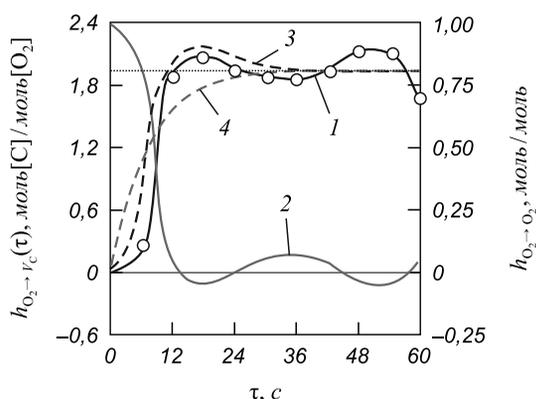


Рис. 3. Переходный процесс по каналу «расход кислорода – скорость окисления углерода»:

- 1 – по изменению скорости окисления углерода  $h_{O_2 \rightarrow v_C}(\tau)$ ;
- 2 – по изменению потока кислорода в ванну  $h_{O_2 \rightarrow O_2}(\tau)$ ;
- 3 – аппроксимация колебательным звеном при  $K = 1,945$ ;  
 $\gamma = 0,164$ ;  $\omega = 11$  град/с;  $\alpha = 39,2^\circ$ ;
- 4 – аппроксимация аperiodическим звеном при  $T = 18,5$  с,  $K = 1,945$

переходным процессом от внесенного возмущения по каналу управления.

Гистограммы вероятностей распределения по времени периода ( $T_1$ ) переходного процесса колебательного звена  $W_{O_2 \rightarrow v_C}(P)$  и  $T_2$  (рис. 4) показали, что они образуют практически непрерывный гармонический ансамбль колебаний с периодами от 8 до 45 с. При этом обе группы перекрываются и переходят друг в друга практически непрерывно. Амплитуда изменений скорости окисления углерода по переходному процессу соответствует амплитуде вынужденных колебаний расхода кислорода. Амплитуда мощности изменения скорости окисления углерода с периодом  $T_2$  составляет 16 % общего изменения скорости окисления.

Установленные экспериментально значения показателя экспоненты затухания колебательного процесса  $\gamma$  (см. табл. 1) позволили оценить время достижения заданного установившегося значения с погрешностью менее 5 %. Это время при  $\gamma = 0,151$  (см. табл. 1) в сред-

нем равно 20,1 с. Оно составляет четверть периода изменения скорости окисления углерода, если рассматривать полный цикл колебания переменной на этой гармонической составляющей, т. е. 80 с. Колебания  $V_C$  с таким периодом должны, в соответствии с уравнением ([1], уравнение 6), иметь мощность около 70 ÷ 80 дБ. Колебания  $V_C$  с периодом  $T_2$  (10 – 20 с) должны иметь мощность соответственно около 50 ÷ 60 дБ ([1], рис. 8). Разница составляет 20 дБ. Фактическая разница средних мощностей этих компонентов  $\Delta V_C$  по экспериментальным данным переходных процессов ( $A_1 = 1,85$ ,  $A_2 = 0,295$ , см. табл. 1) составляет 16 дБ. Результаты с погрешностью менее остаточного среднеквадратического отклонения (9,8 дБ) уравнения ([1], уравнение 8), вполне соответствуют полученным ранее по закону распределения мощности колебаний переменной скорости окисления углерода в спектре их стохастической структуры.

Таким образом результаты анализа переходного процесса подтверждают выводы, сделанные на базе чисто стохастического анализа колебаний переменной составляющей скорости окисления углерода как случайного стационарного, эргодического процесса и позволяют говорить о высказанных идеях стохастических структур гармонического ряда колебаний переменной составляющей  $V_C$  не как о гипотезе, а как о законах формирования этой составляющей, отражающих реальность изучаемых явлений.

Естественным шагом дальнейших исследований было желание определить взаимосвязи параметров переходного процесса с технологическими факторами. С этой целью использовали величину, примерно пропорциональную массе шлака ( $G_{\text{шл}}^*$ ) к моменту внесения периодических воздействий на процесс изменением расхода кислорода.

Расчет  $G_{\text{шл}}^*$  производили по уравнению

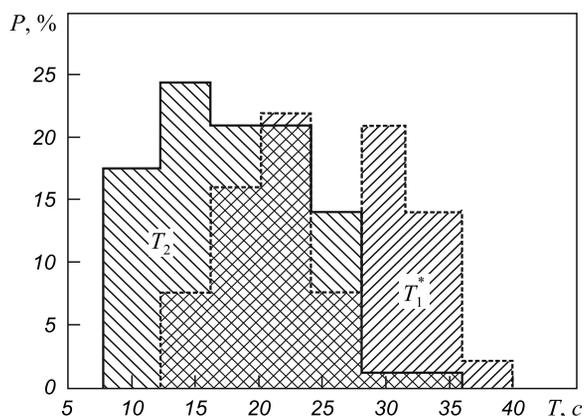


Рис. 4. Гистограмма распределения периодов колебаний скорости окисления углерода при периодическом изменении расхода кислорода:

$T_2$  – период частоты малой амплитуды, длительность которого слабо связана с характеристиками шлака;  $T_1^*$  – постоянная времени колебательного звена по каналу управления «расход кислорода – скорость окисления углерода»

$$G_{\text{шл}}^* = \frac{M_{\text{O}_2}}{V_{\text{мол}}} 10^{-3} \left( \sum V_{\text{O}_2} - \frac{V_{\text{мол}}}{M_{\text{C}}K} \sum V_{\text{C}} \right) + K_{\text{из}} G_{\text{изв}}^* \quad (3)$$

где  $M_{\text{O}_2}$ ,  $M_{\text{C}}$  – молекулярные массы кислорода и углерода, кг/моль;  $V_{\text{мол}} = 24,48 \text{ м}^3/\text{кмоль}$  – молярный объем идеального газа при нормальных условиях;  $K_{\text{из}}$  – коэффициент усвоения извести, 0,85;  $G_{\text{изв}}$  – масса отданной в конвертер извести, т;  $K = 1,85 \text{ моль/моль}$  – коэффициент усиления по каналу кислород – скорость окисления углерода.

В качестве аргумента функций  $T_2$  и  $(T_2 + T_1)$  использовались и оценки, в какой-то степени связанные с вязкостными свойствами шлаковой фазы, выражаемыми либо количеством кислорода продувки, накопленного в шлаке ( $G_{\text{шл}}^{\{\text{O}_2\}}$ ), либо комплексом  $\left( G_{\text{шл}}^{\{\text{O}_2\}} \frac{G_{\text{шл}}^*}{G_{\text{изв}}^*} \right)$ . Резуль-

таты исследований сведены в табл. 2. Они позволили установить влияние на величину постоянной времени колебательного звена ( $T_1^*$ ) массы шлака и его удельной массы, приходящейся на  $1 \text{ м}^3$  кислорода, подаваемого на продувку (см. табл. 2, уравнения 2, 14; рис. 5, 6). В определенной степени отслеживается зависимость длительности периода  $T_2$  от массы шлака (см. табл. 2, уравнения 4, 16; рис. 7). Наблюдается незначительное влияние на величину  $T_2$  минутного расхода кислорода (см. табл. 2, уравнения 4, 7, 16).

Представленные зависимости в своей совокупности позволяют сделать вывод о том, что колебания  $V_{\text{C}}$  с периодом  $T_2$  вероятно относятся по своей природе к процессам, происходящим в структурах «реакционной зоны». Так анализ зависимостей 4, 5 в табл. 2 и рис. 7 свидетельствуют о том, что при стремлении фактора,

Таблица 2

**Связь параметров переходного процесса по каналу «расход кислорода – скорость окисления углерода» с технологическими факторами**

Номер	Уравнение	Коэффициент множественной регрессии	Коэффициент парной корреляции			Доля влияния на $S_y$		$S_{\text{ост}}$	$S_y$
			$Y \rightarrow X_1$	$Y \rightarrow X_2$	$X_1 \rightarrow X_2$	$X_1$	$X_2$		
1	$T_1 = 0,895 + 1,204G_{\text{шл}}^*$	0,52	0,52	–	–	27,1	–	6,73	7,75
2	$T_1^* = -2,82 + 1,17G_{\text{шл}}^*$	0,67	0,67	–	–	44,7	–	5,33	7,05
3	$\lg T_1^* = -0,0645 + 1,05 \lg G_{\text{шл}}^*$	0,64	0,64	–	–	41,2	–	0,094	0,12
4	$T_2 = 7,73 + 0,393G_{\text{шл}}^*$	0,30	0,30	–	–	8,93	–	5,13	5,27
5	$(T_1^* + T_2) = 5,54 + 1,5G_{\text{шл}}^*$	0,62	0,62	–	–	38,71	–	7,70	9,65
6	$T_1^* = 11,31 + 1,24G_{\text{шл}}^* - 0,0135V_{\text{O}_2}$	0,675	0,67	-0,27	-0,27	42,9	2,70	5,40	7,05
7	$T_2 = 27,16 + 0,33G_{\text{шл}}^* - 0,019V_{\text{O}_2}$	0,35	0,30	-0,25	-0,26	7,48	4,62	5,14	5,27
8	$\xi = 0,74 - 0,067G_{\text{шл}}^{\{\text{O}_2\}}$	0,37	0,37	–	–	—	–	0,144	0,152
9	$\xi = 0,724 - 0,053G_{\text{шл}}^{\{\text{O}_2\}}$	0,39	0,39	–	–	—	–	0,143	0,152
10	$T_{\text{ан}} = -12,8 + 1,2G_{\text{шл}}^*$	0,68	0,68	–	–	45,9	–	4,41	5,91
11	$\lg T_{\text{ан}} = -1,357 + 1,794G_{\text{шл}}^*$	0,66	0,66	–	–	43,8	–	0,135	0,178
12	$T_{\text{ан}}^* = -10,16 + 0,954G_{\text{шл}}^*$	0,63	0,63	–	–	39,4	–	4,05	5,09
13	$\lg T_{\text{ан}}^* = -1,44 + 1,83 \lg G_{\text{шл}}^*$	0,61	0,61	–	–	37,4	–	0,152	0,188
14	$T_1^* = 0,03 + 1,006 \frac{G_{\text{шл}}^*}{V_{\text{O}_2}}$	0,672	0,672	–	–	45,2	–	5,31	7,05
15	$\lg T_1^* = 0,083 + 0,396 \lg \frac{G_{\text{шл}}^*}{V_{\text{O}_2}}$	0,64	0,64	–	–	41,5	–	0,094	0,121
16	$T_2 = 6,87 + 0,409 \frac{G_{\text{шл}}^*}{V_{\text{O}_2}}$	0,356	0,356	–	–	12,65	–	5,02	5,27
17	$T_{\text{ан}} = 5,09 + 0,334 \frac{G_{\text{шл}}^*}{V_{\text{O}_2}}$	0,28	0,28	–	–	7,8	–	5,51	5,63
18	$\lg T_{\text{ан}} = 0,437 + 0,471 \lg \frac{G_{\text{шл}}^*}{V_{\text{O}_2}}$	0,226	0,226	–	–	5,1	–	0,172	0,173
19	$T_{\text{ан}} = 5,60 + 0,31T_1^*$	0,40	0,40	—	—	15,2	–	5,26	5,61

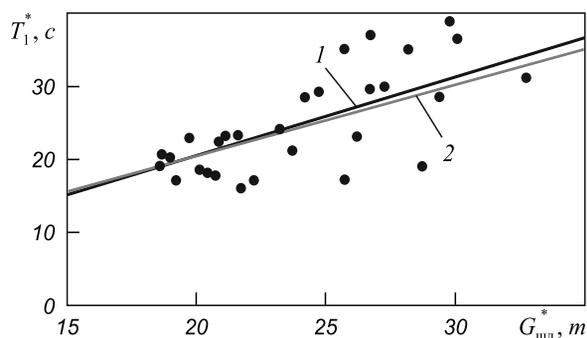


Рис. 5. Зависимость постоянной времени ( $T_1^*$ ) колебательного звена передаточной функции  $W_{O_2 \rightarrow V_C}(P)$  от величины, характеризующей массу шлака ( $G_{\text{шл}}^*$ ):

$$1 - T_1^* = -2,82 + 1,17G_{\text{шл}}^*; 2 - T_1^* = -0,0645 + 1,0561 \lg G_{\text{шл}}^*$$

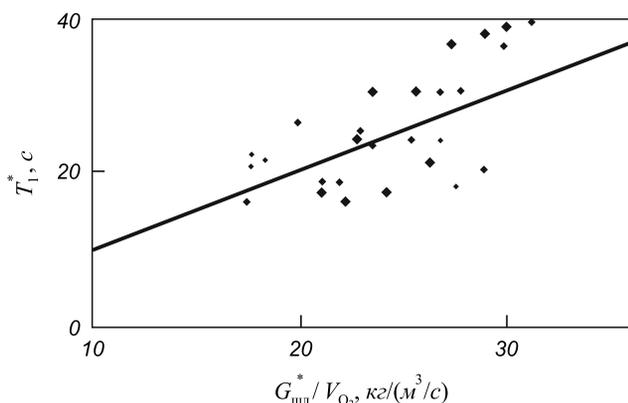


Рис. 6. Зависимость постоянной времени ( $T_1^*$ ) колебательного звена передаточной функции  $W_{O_2 \rightarrow V_C}(P)$  от величины, характеризующей массу шлака, приходящуюся на  $1 \text{ м}^3$  кислорода, подаваемого на продувку

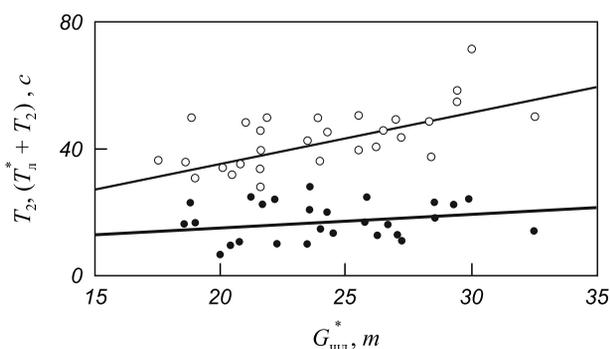


Рис. 7. Зависимость  $T_2$  и  $(T_1^* + T_2)$  от величины, характеризующей массу шлака:

- – экспериментальные значения периода  $T_2$ ;
- – экспериментальные значения  $(T_1^* + T_2)$

характеризующего массу шлака ( $G_{\text{шл}}^*$ ) к нулю, значения функций стремятся к одному и тому же пределу от 5 до 8 с. В одном случае – это сам период  $T_2$  (см. табл. 2, уравнение 4), в другом – это сумма периодов  $(T_1^* + T_2)$  (см. табл. 2, уравнение 5).

Величина постоянной времени колебательного звена должна стремиться к нулю при  $G_{\text{шл}}^* \rightarrow 0$ , так как это гармоническая составляющая отражает процессы,

происходящие при взаимодействии шлаковой фазы с металлической ванной. Поэтому наличие предела у функции  $(T_1^* + T_2)$  при  $G_{\text{шл}}^* \rightarrow 0$  может объясняться только существованием предела у  $T_2$  в этих условиях. Эти выводы подтверждаются уравнениями зависимости  $T_1^*$  от удельной массы шлака на  $1 \text{ м}^3$  подаваемого в ванну кислорода (см. табл. 2, уравнение 14) и характером зависимости  $T_2$  от того же фактора (см. табл. 2, уравнение 16). В первом случае  $T_1^* \rightarrow 0$  при  $\frac{G_{\text{шл}}^*}{V_{O_2}} \rightarrow 0$ ,

а во втором  $T_2 \rightarrow 6,87 \text{ с}$  при  $\frac{G_{\text{шл}}^*}{V_{O_2}} \rightarrow 0$ . В табл. 3 при-

ведены значения периода колебаний  $\Delta V_C$  при  $G_{\text{шл}}^* \rightarrow 0$  для всех случаев, анализировавшихся в рамках данной работы и относящихся к периоду  $T_2$ . По этим данным можно утверждать, что период колебаний, соответствующий РЗ, лежит в пределах  $6,2 \pm 1,1$  с вероятностью 68 %.

Полученная величина вполне согласуется с данными работ [9, 10].

Таким образом можно утверждать, что при ступенчатом изменении расхода кислорода основное изменение скорости окисления углерода может быть аппроксимировано колебательным звеном с постоянной времени, значение которой определяется на 45 % (см. табл. 2) изменением удельной массы шлака на  $1 \text{ м}^3$  кислорода, подаваемого на продувку (см. табл. 2, уравнение 14). При этом всегда присутствует периодическая составляющая, примерно на 20 дБ меньшая по мощности, обусловленная колебательными явлениями в РЗ.

Вторым параметром колебательного звена является относительный коэффициент затухания  $\xi$ . Обработка и анализ экспериментальных данных показали, что  $\xi$  является функцией факторов имеющих непосредственное отношение к вязкости шлаковой фазы (см. табл. 2, уравнения 8, 9; рис. 8, 9). Более детальные исследования выполнить оказалось невозможно из-за отсутствия соответствующих экспериментальных данных.

Учитывая полученные большие значения относительного коэффициента затухания, а в связи с этим и быстрое затухание колебательного процесса, была проверена возможность аппроксимации изучаемого переходного процесса обычным аperiodическим звеном (см. рис. 3). Были аппроксимированы все 40 реализаций, полученных экспериментально. В связи с переменным значением коэффициента усиления  $K$  посто-

Таблица 3

Значения длительности периода колебаний переменной составляющей  $V_C$ , с при  $G_{\text{шл}}^* \rightarrow 0$  (по данным табл. 2)

Уравнение					Среднее значение	$S_{\text{ост}}$
4	5	16	17	19		
7,73	5,54	6,87	5,09	5,6	6,2	1,1

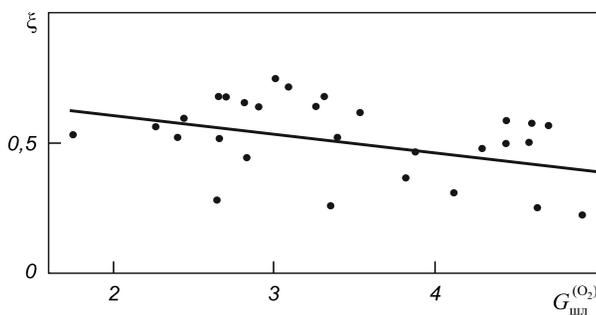


Рис. 8. Зависимость относительного коэффициента затухания от количества кислорода, накопленного в шлаке

янная времени определялась по скорости приращения в момент начала изменения  $V_C$  при предположении постоянного коэффициента усиления ( $K = 2$ ). Полученные значения постоянной времени обозначены как  $T_{ан}$  (см. табл. 2). Отдельно были рассчитаны постоянные времени ( $T_{ан}^*$ ) при фактических значениях коэффициентов усиления, принятых равными амплитуде  $A_1$  (см. табл. 2).

Результаты анализа показали, что попытка более корректной оценки постоянной времени аппроксимирующего апериодического процесса ( $T_{ан}^*$ ) ухудшает ее связи с технологическими факторами процесса продувки (см. табл. 2, уравнения 10, 12). Более благополучно дело обстоит с величиной  $T_{ан}$ , фактически являющейся обратной величиной ускорения скорости окисления углерода в данный момент начала ее изменения (см. табл. 2, уравнение 10). Явное ухудшение связи  $T_{ан}$  с величиной удельной массы шлака на  $1 \text{ м}^3$  кислорода продувки (см. табл. 2, уравнение 17) по сравнению с влиянием всей массы шлака (см. табл. 2, уравнение 10) лишней раз подчеркивает, что  $T_{ан}$  следует трактовать как обратную величину ускорения скорости окисления углерода при изменении расхода кислорода на продувку. Последнее должно определяться способностями шлака ассимилировать или восстанавливать нарушенный динамический баланс распределения кислородных потоков между фазами. Разумеется, способность к ассимиляции или восстановлению потоков будет в первую очередь зависеть от емкости фазы, т. е. от ее массы. О том, что найденная  $T_{ан}$  не адекватна  $T_1^*$ , говорят результаты исследования их стохастической взаимосвязи с технологическими характеристиками (см. табл. 2, уравнение 19; рис. 10).

Выше было показано особое влияние изменения интенсивности подачи кислорода на процесс окисления углерода, связанное с возможностью существенного изменения перераспределения потоков окислителя между шлаковой и металлической фазами, что послужило основанием к разработке одного из способов ведения конвертерной плавки. Перераспределение в системе шлак-металл может быть вполне удовлетворительно описано колебательным звеном по каналу расход кислорода продувки – скорость окисления углерода. Такой

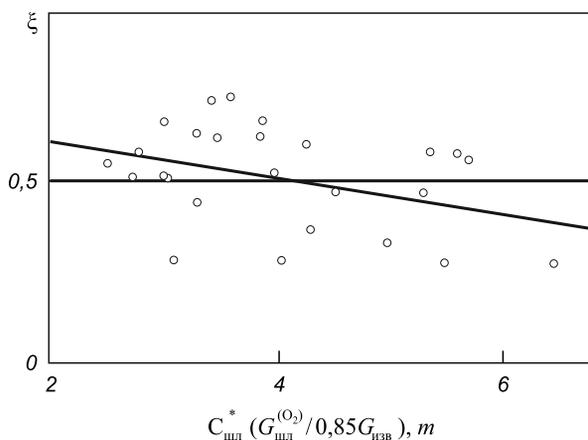


Рис. 9. Зависимость относительного коэффициента затухания от фактора  $C_{шл}^* \frac{G_{шл}^{(O_2)}}{0,85 G_{изв}}$ , m

вывод позволил рассмотреть это явление как колебательную систему при наличии трения в случае воздействия на нее вынужденных колебаний. Если частоту ( $\omega_1$ ) вынужденного воздействия (расхода кислорода продувки) организовать таким образом, чтобы каждая четверть ее периода соответствовала бы длительности переходного процесса ( $t_{пер}$ ) изученного колебательного звена, то должен получиться процесс чисто колебательный [11]:

$$V_C = K\bar{V}_{O_2} + b \sin(\omega_1 t + \delta) + a e^{-\gamma t} \sin(\omega t + \delta). \quad (4)$$

Поскольку третий член уравнения при  $t \geq t_{пер}$  будет вносить погрешности в оценках  $V_C$  менее 5%, то уравнение (4) при вынужденных колебаниях  $V_{O_2} = V_{O_2} + A \sin(\omega_1 t + \delta)$  можно представить как незатухающий детерминированный процесс [9]:

$$V_C = K\bar{V}_{O_2} + \frac{KK_1 V_{O_2} \omega_0^2}{\sqrt{(\omega_{0v_c}^2 - \omega_1^2) + 4\xi^2 \omega_0^2 \omega_1^2}} \sin(\omega_1 t + \delta), \quad (5)$$

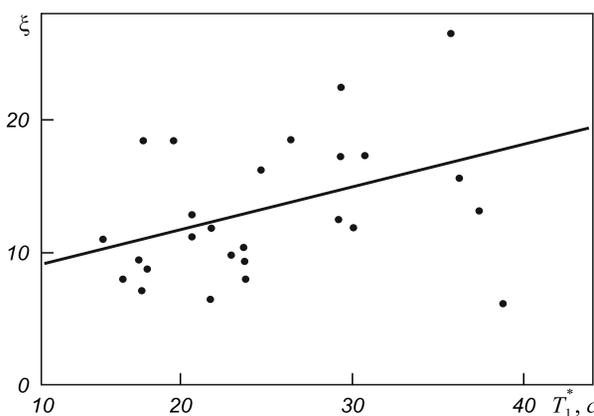


Рис. 10. Корреляционное поле стохастической связи постоянной времени колебательного звена с постоянной времени апериодического звена, аппроксимирующих переходный процесс по каналу «расход кислорода – скорость окисления углерода»

где  $K_1 V_{O_2} = A$  – амплитуда колебаний расхода кислорода,  $K_1 \sim 0,2$ ;  $\omega_{0V_C}$  – резонансная частота процесса колебания скорости окисления углерода.

Сдвиг по фазе  $\delta$  может быть найден из соотношения:

$$\delta = \arctg \frac{\xi \omega_{0V_C}}{2\pi \sqrt{\omega_{0V_C}^2 - \omega_1^2}}. \quad (6)$$

Исходя из сказанного выше, период колебаний такой системы будет связан со временем переходного процесса соотношением:

$$T = 4t_{пер}. \quad (7)$$

В свою очередь из схемы распределения параметров колебательного звена (см. рис. 2) следует, что

$$t_{пер} = 1,498 \left( \ln \frac{A_1}{A_2} \right)^{-1} T_1^*. \quad (8)$$

Множитель 1,498 представляет собой взятую с обратным знаком константу  $(\ln \Delta / 2)$ , где  $\Delta$  – принятая допустимая относительная погрешность в долях изменяющейся функции по отношению к установившемуся предельному (при  $t \rightarrow \infty$ ) ее значению.

Для рассматриваемого конкретного случая коэффициент пропорциональности по средним значениям  $A_1$  и  $A_2$  (см. табл. 1) составляет 0,816. Следовательно в среднем время переходного процесса фактически оказывается меньше постоянной времени этого колебательного звена на 18,4 %. Это лишний раз под-

тверждает правомочность сделанных допущений в отношении третьего слагаемого уравнения (4) и корректность уравнения (5). Основываясь на известном соотношении

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \sqrt{1 - 2\xi^2}, \quad (9)$$

где  $\omega_0$  – резонансная частота колебательной системы и с учетом уравнения (7) получим

$$\omega_{0V_C} = \frac{2\pi}{4t_{пер}} \sqrt{1 - 2\xi^2}. \quad (10)$$

Уравнения (5), (7) и (10) позволяют оценить величину амплитуды в данном конкретном случае по средним значениям параметров колебательного процесса при  $\omega_0 V_C \approx \omega_1 \approx 0,055$ . Результаты этой оценки показывают, что с определенной степенью приближения, вполне пригодной для практических целей, можно уравнение (5) упростить и представить в виде:

$$V_C = K \bar{V}_{O_2} + \frac{KK_1 \bar{V}_{O_2}}{2\xi} \sin(\omega_1 t + \delta). \quad (11)$$

Сдвиг по фазе  $\delta$  в предельном случае может составить значение  $\pi/2$  при совпадении резонансной частоты с вынужденными колебаниями.

В табл. 4 представлены результаты опытных плавков, на которых были организованы такие вынужденные воздействия по расходу кислорода. Их можно сравнить с аналогичными результатами организации периодического изменения положения фурмы.

Таблица 4

Результаты опытных плавков с организацией циклического изменения расхода кислорода или положения фурмы в период активного окисления углерода

Номер плавки	$T_{\Delta V_{O_2}}$ , мин	$A_{\Delta V_{O_2}}$ , м <sup>3</sup> /мин	$A_{\Delta H_{\Phi}}$ , мм	$T_{\Delta H_{\Phi}}$ , мин	$A_{\Delta V_C}$ , м <sup>3</sup> /мин	$K$ , моль/моль	$T_{\Delta V_C}$ , мин	Примечание
5206	3,0	120,5	–	–	139,2	1,15	3,07	–
5207	2,12	87,3	–	–	110,6	1,27	1,27	–
5208	2,05	110,4	–	–	163,4	1,48	1,48	–
5209	1,38	80,5	–	–	174,8	2,17	4,76 1,05	На плавках происходило биение колебаний, сопровождавшееся резким возрастанием $V_C$ и выбросами
5210	1,2	125,4	–	–	148,9	1,187	2,33 1,22	То же
5211	1,15	122,4	–	–	152,3	1,244	1,19 0,86	Биения колебаний фиксировались, но выбросов не наблюдалось
5249	–	–	91	3	84,2	–	–	Коэффициент затухания экспоненты уравнения $\Delta V_C = Ae^{-\alpha t}$ ; $\alpha \approx 0,9$ (1/мин)
5250	–	–	88	2	89,2	–	–	Коэффициент затухания экспоненты уравнения $\Delta V_C = Ae^{-\alpha t}$ ; $\alpha \approx 0,87$ (1/мин)
5251	–	–	98	1,5	109,6	–	–	Коэффициент затухания экспоненты уравнения $\Delta V_C = Ae^{-\alpha t}$ ; $\alpha \approx 0,86$ (1/мин)

Таблица 5

В этой серии были проведены плавки с циклическим изменением положения фурмы. Результаты этих последних экспериментов подтвердили ранее полученные результаты по переходному процессу канала «положение фурмы – скорость окисления углерода». Автокорреляционная функция  $V_C$  при изменении положения фурмы носит затухающий характер, аппроксимируется уравнением вида  $Ae^{-at}$  и не имеет периодических составляющих. Это полностью подтверждает сделанные ранее выводы о саморегулируемости процесса при возмущениях по каналу «положение фурмы – скорость окисления углерода».

Идея организации вынужденных колебаний скорости окисления углерода определенным законом изменения части расхода кислорода так же нашла свое полное подтверждение. Резонансная частота (уравнение 10) для изучавшихся условий работы агрегатов большой вместимости должна иметь период, близкий к 1,5 – 2 мин. Эти расчеты были подтверждены опытными плавками с циклическим изменением расхода кислорода с периодами от 1 до 3 мин. Оказалось, что формирующиеся циклы изменения скорости окисления углерода полностью соответствуют периодам вынужденного изменения расхода кислорода (см. табл. 4). При этом на плавках с периодом изменения расхода кислорода, близким к резонансному, была получена максимальная амплитуда колебаний  $V_C$  с коэффициентом усиления  $\approx 2$ . На плавках № 5209 и 5210 наблюдались максимальные пиковые (биение) изменения скорости окисления углерода и зарегистрированы выбросы в моменты увеличения расхода кислорода.

Поэтому в дальнейшем были проведены опытные плавки, на которых период изменений расхода кислорода не превышал 60 с и амплитуда колебаний  $V_{O_2}$  была уменьшена до 10 – 15 % среднего его расхода. Результаты сведены в табл. 5.

При проведении этой серии плавок в начальный период продувки (первые 6 мин.) расход кислорода выдерживался на обычном уровне (900 – 1000 м<sup>3</sup>/мин). С шестой минуты до начала снижения скорости окисления углерода на завершающей стадии процесса расход кислорода периодически изменялся. Известь для уменьшения выноса пыли и выбивания факела присаживалась в моменты снижения расхода кислорода порциями по 2 т, не более. Колебания скорости окисления углерода носили практически детерминированный характер (рис. 11). Их частота совпадала с частотой изменения расхода кислорода и оставалась постоянной как от плавки к плавке, так и по ходу ее продувки. Таким образом спектральный состав переменной составляющей стабилизировался. В области исследовавшихся частот он фактически стал монохромным, соответствующим частоте вынужденных колебаний расхода кислорода продувки. Это хорошо подтверждается приведенным примером (рис. 11), данными табл. 5 и окончательно подтверждается

Результаты опытных плавок с циклическим изменением расхода кислорода в период интенсивного окисления углерода на конвертерах большой вместимости,  $T = 60$  с

Номер	$\bar{V}_C$ , кг/мин	$A_{\Delta V_C}$ , кг/мин	$T_{\Delta V_C}$ , с	Число гармонических составляющих
1	888	91,3	60,0	1
2	927	51,9	76,2	1
3	730	85,1	70,2	1
4	935	43,0	56,4	1
5	892	60,5	60,6	1
6	1010	71,2	67,2	1
7	850	99,0	63,6 32,4	2
8	966	61,7	68,4 33,6	2
9	895	74,3	66,0	1
10	878	79,8	69,6	1
11	990	82,1	55,2	1
12	1000	58,7	55,2 27,6	2
13	865	65,9	61,8	1
14	869	58,5	60,0	1
15	940	40,8	100,2	1
16	892	68,3	60,0	1

сравнением автокорреляционных функций переменных составляющих скорости окисления углерода и расхода кислорода, полученных на плавках опытной серии (рис. 12). Результаты технологического анализа выполненной серии плавок по сравнению с плавками, проведенными по общепринятой технологии показали, что одновременно с уменьшением амплитуды ко-

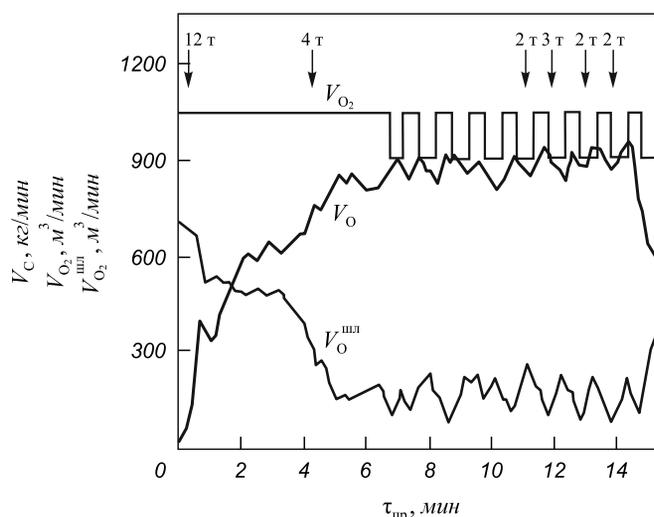


Рис. 11. Изменение скорости окисления углерода ( $V_C$ ) и скорости накопления кислорода в ванне ( $V_{O_2}^{пл}$ ) при периодическом изменении расхода кислорода ( $V_{O_2}$ ),  $T = 60$  с

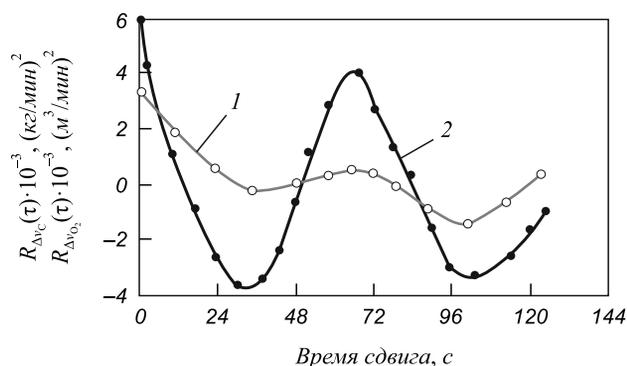


Рис. 12. Автокорреляционные функции переменных, составляющих скорости окисления углерода  $R_{\Delta V_C}^{(\tau)}$  и расхода кислорода  $R_{\Delta V_{O_2}}^{(\tau)}$  при организации циклического изменения расхода кислорода: 1 –  $R_{\Delta V_C}(\tau)$ ; 2 –  $R_{\Delta V_{O_2}}(\tau)$

лебаний  $V_C$  достигалось общее снижение дисперсии переменной составляющей скорости окисления углерода. Визуальные наблюдения за ходом плавки и их контроль по регистрируемому акустическому сигналу позволили убедиться в том, что на опытной серии стабилизировалось состояние ванны, режим состояния шлака (отсутствие чрезмерного вспенивания и периодов его гетерогенизации). Это в первую очередь сказалось на сокращении вероятности возникновения выбросов, более полном удалении в шлак серы и фосфора, снижении расхода огнеупоров и улучшении ассимиляции извести.

Разработанные технологии были в свое время испытаны и внедрены на конвертерах с газоходами с полным дожигом и на конвертерах без дожига.

Эксплуатация показала, что достигается существенная стабилизация окисленности шлака, возрастает соответственно выход жидкого полупродукта на 0,3 – 0,5 %. Улучшается удаление серы и фосфора в шлак, стабилизируется содержания марганца в металле по окончании продувки, полностью исключаются выбросы, снижается удельный расход кислорода (~ на 1 м<sup>2</sup>/т).

Основная трудность, которая в условиях России оказывается непреодолимой, это требование нормальной работы системы регулирования избыточного давления под подвижной заслонкой газохода над горловиной конвертеров, работающих без дожига.

Главной причиной ухудшения работы системы отвода газов является ее забивание пылевыми выбросами из агрегата, главным образом пылевидной известью. Коэффициент использования извести находится на уровне 85 % подаваемого веса на плавку.

Полученные теоретические и практические результаты позволяют утверждать о практическом наличии в системе шлак–металл стационарного неравновесного

состояния и применение к этим системам расширенного принципа Ле-Шателье, о котором писал еще в начале прошлого века российский ученый-металлург В.Е. Грум-Гржимайло [12].

В конвертерной ванне в период активного окисления углерода окислительно-восстановительные процессы протекают практически при установлении стационарного неравновесного состояния (СНС). Это состояние обладает асимптотической устойчивостью. В открытой системе конвертерного процесса СНС является аттрактором, как равновесие для закрытой, в классической термодинамике закрытых систем.

В данном случае получено редкое совпадение теории и практики и доказано преимущество анализа высокотемпературных металлургических систем с позиций термодинамики необратимых процессов.

Следует отметить и то, что идею о применении понятия «Расширенного принципа Ле-Шателье Брауна» при управлении сталеплавильной ванной в процессе ее рафинирования высказывал еще в 20-х годах прошлого века В.Е. Грум-Гржимайло [12], задолго до доказательства теоремы об СНС Глинсдорфом и Пригожиным в сороковых.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О कोरोков Б.Н. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 1. С. 55 – 56.
2. Зимин В.Ю., О कोरोков Б.Н., Поживанов М.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1982. № 11. С. 149.
3. Зимин В.Ю., О कोरोков Б.Н., Нам В.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1982. № 9. С. 148 – 149.
4. О कोरोков Б.Н., Смирнов Е.А. // Сталь. 1989. № 7. С. 19 – 23.
5. О कोरोков Б.Н. Термодинамика необратимых процессов и процессы сталеплавильного производства: Сб. тр. «Металлургия и металлургия XXI века». – М.: МИСиС, 2001. С. 454 – 499.
6. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
7. Гитис Э.И., Данилович Г.А., Самойленко В.И. Техническая кибернетика. – М.: Советское радио, 1969. – 486 с.
8. Литвинов А.П., Моржаков С.П., Фабрикант Е.А. Основы автоматизации. – М.: Машиностроение, 1967. – 272 с.
9. Явойский А.В. Разработка, исследование и применения пульсирующего дутья в сталеплавильном производстве: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИСиС, 1983. – 419 с.
10. Баптизманский В.И., Хотский В.Б. Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса. – Киев-Донецк.: Вища школа, 1981. – 184 с.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. – М.: Физматгиз, 1958. – 206 с.
12. Грум-Гржимайло В.Е. Производство стали. – М. – Л.: ГНТИ, 1931. – 408 с.