

УДК: 669.02/09:669.162.262

**Д.Н.Тогобицкая, Н.А.Гладков, И.Г.Муравьева
В.С.Листопадов, К.А.Дмитренко**

*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины
ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог»*

ХАРАКТЕРИСТИКА ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ И ПОКАЗАТЕЛИ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ШИХТЫ

Рассмотрены особенности использования физико–химических критериев, позволяющих оперативно оценивать и управлять процессами шлакообразования в доменной печи, во взаимной согласованности технологических и физико–химических параметров.

Известна важная роль качества железорудных материалов в формировании характера, состава и свойств, получаемых в жидком виде продуктов плавки, на образование которых затрачивается большое количество химической, тепловой и механической энергии. При проплавке многокомпонентной шихты, в частности, используемой на ДП № 9 комбината «Криворожсталь» каждый из компонентов генерирует характерную его особенностям жидкую фазу определенного состава и свойств в большинстве случаев далеко не соответствующих рациональной для печи. Разрешением ситуации является установление рационального соотношения компонентов шихты, приводящих к образованию конечного шлака заданного качества. При этом принципиально следовало бы тем или иным (лучше экспериментальным) путем предварительно определить рациональные с позиций плавкости, либо наукоемких критериев, соотношения попарного (а затем и последующего) сочетания компонентов шихты. Такой подход, к сожалению, до настоящего времени не разработан. Обычно получаемые расчетным путем из задаваемых исходные шихтовые материалы и их соотношения, состава чугуна, основности и MgO в шлаке, распределения элементов между продуктами плавки результаты обеспечивают удовлетворительный их состав, но не всегда хорошие свойства.

Невысокая, в большинстве случаев стабильность конечного шлака в практике работы ДП № 9 обусловлена большой колеблемостью состава и свойств шихтовых материалов и характером их сочетаний. Об уровне стабильности конечного шлака (КШ) ДП № 9 можно судить по данным табл.1, где приведены заведомо не лучшие показатели качества продуктов плавки и соответствующих им технологических параметров в периоды проплавки шихтовых материалов недостаточно высокого качества. Данные табл.1 свидетельствуют о большом диапазоне изменения составляющих продуктов плавки (влияющих, естественно, на стабильность технологических параметров), хотя в усредненном виде они соответствуют технологическим условиям на качество продуктов плавки.

Таблица 1. Показатели состава продуктов доменной плавки и дутьевого режима ДП №9 ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог» (min–max)/среднее)

Показатель	Значение		Показатель	Значение	
	июнь–декабрь 2002 г.	январь–октябрь 2005 г.		июнь–декабрь 2002 г.	январь–октябрь 2005 г.
[Si],%	(0,30–2,05) 0,84	(0,29–1,90) 0,90	L_S	(13,83–200) 74,48	(29,6–106,7) 67,89
[Mn],%	(0,03–0,7) 0,41	(0,11–0,76) 0,38	L_{Si}	(18,87–131,3) 46,70	(25,51–75,28) 43,58
[S],%	(0,008–0,07) 0,024	(0,009–0,069) 0,022	L_{Mn}	(0,29–11,67) 0,87	(0,43–1,93) 0,74
[P],%	(0,036–0,80) 0,056	(0,046–0,10) 0,068	Рудная нагрузка	(3,08–3,86) 3,65	(3,10–4,60) 4,09
(SiO ₂),%	(35,2–43,2) 39,01	(35,2–41,8) 38,63	Интен-ть по коксу	(0,25–0,87) 0,69	(0,18–0,98) 0,65
(Al ₂ O ₃),%	(5,0–9,9) 6,85	(4,6–9,0) 7,22	$R_{дуть}$, м ³ /мин	(5403–7336) 6867	(4544–7284) 6729
(CaO),%	(42,8–51,4) 48,08	(40,7–51,8) 47,36	$T_{дуть}$, °C	(898–1144) 1104	(807–1168) 1101
(MnO),%	(0,11–0,95) 0,35	(0,10–0,74) 0,28	$P_{дуть}$, ати	(2,08–3,94) 3,05	(1,7–3,69) 3,19
(MgO),%	(3,7–6,7) 5,20	(3,5–7,7) 6,09	O _{2дуть} ,%	(22,3–27,3) 25,78	(20,8–28,2) 25,84
(FeO),%	(0,10–1,24) 0,25	(0,07–1,15) 0,19	$R_{пр.г.}$, м ³ /т	(79–123) 107	(33–282) 90,7
(S),%	(1,1–2,4) 1,71	(0,7–2,0) 1,46	$P_{кол.г.}$, ати	(0,62–1,52) 1,39	(0,24–1,70) 1,28
CaO/SiO ₂	(1,0–1,45) 1,23	(0,93–1,47) 1,23	η_{CO}	(0,384–0,554) 0,428	(0,371–0,469) 0,428
Al ₂ O ₃ /MgO	(0,94–2,14) 1,30	(0,81–1,72) 1,19	$T_{гор}$, °C	(1979–2144) 2072	(2041–2219) 2137
Производство чугуна, т	(2457–8328) 7292	(750–8965) 7444	Расход кокса, кг/т	(408–640) 475	(368–495) 434

Учитывая важность влияния процессов жидкообразования на состав и свойства продуктов плавки, эффективность технологического режима, его стабильность, нами разработана система оценки шлакового режима и научно обоснованных подходов к установлению наиболее рационального его состояния во взаимной согласованности технологических и физико-химических параметров формирующихся в ходе агрегатных превращений сырья в процессе плавки.

Оценка состояния и свойств многокомпонентных шлаковых расплавов осуществляется на основе сверстки их химического состава в физико-

химические критерии (параметры), главные из которых – показатель стехиометрии ρ (аналог основности) и показатель химической активности – Δe (химический эквивалент). Путем сопоставлений и определений взаимосвязей ρ и Δe с известными (определенными экспериментально, или приведенными в литературе) показателями качества расплавов: вязкость η , поверхностное натяжение σ , теплосодержание (энтальпия) ΔH , микрооднородность $d\Delta e$, электропроводность Эс и др. в ИЧМ [1, 2] разработаны соответствующие модели, позволяющие по составу расплава прогнозировать комплекс его свойств. Учитывая значимую роль шлакового режима в системе управления процессом плавки в соответствии с проектом модернизации АСУ ТП на ДПП №9 после капитального ремонта первого разряда в состав подсистем контроля процессов в горне доменной печи, сотрудниками ИЧМ совместно с технологами комбината «Криворожсталь» была разработана и внедрена система контроля и управления шлаковым режимом «Шлак» [3, 4], обеспечивающая наряду с оперативным контролем качества чугуна многокритериальную оптимизацию шлакового режима на основе моделей прогнозирования состава чугуна и шлака, а также комплекса его свойств по составу шихты и показателям дутьевого режима (рис.1). На кривых рисунка отмечены точки с цифрами, ограничивающими минимально и максимально допустимый по условиям данного технологического режима диапазон показателей качества шлака. Внутри диапазона треугольниками показаны значения параметров (критериев) прогнозируемого (реализуемого) состава шлака при использовании данных (планируемых) шихтовых материалов. Отдельно на рисунке приводятся численные показатели, дополнительно характеризующие качество шлака. В случае выхода контролируемых параметров, характеризующих химическую активность шлака (Δe) и его стехиометрию (ρ), за граничные пределы, обеспечивающие требуемое качество чугуна и устойчивую работу горна, изменяются соотношения состава компонентов шихты и технологические показатели, в частности, дутьевого режима по разработанной в ИЧМ методике [5].

В реальных условиях ДП № 9 для получения чугуна с содержанием серы до 0,035% и кремния в пределах 0,6–0,9% определен следующий интервал качества шлака Δe – –2,323 ... –2,217; ρ – 0,708–0,718 (табл.2).

При этом рациональный режим плавки осуществляется при основности шлака $\text{CaO/SiO}_2 = 1,21...1,22$ ед.; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO} = 1,14...1,25$ ед. при среднем содержании серы в чугуне 0,023%, кремния 0,86–0,92%; вязкость шлака при 1500⁰С составляет 0,32 Па·с, ΔH – 1841 кДж/кг, σ_{1500} – 434 мН/м, температура плавления шлака T_c – 1306⁰С.

Так, анализ показателей текущих плавов 1358 выпусков в «интервалы качества» по ρ и Δe попали 869 выпусков (64%). При этом 75% из них обеспечили кондиционность чугуна по сере [S] и 67% по кремнию [Si].

Таблица 2. Качество шлака ДП№9

Параметр	Размерность	Численные значения			
		Min	max	сред.	Рациональное
Δe	–	–2,323	–2,217	–2,27	–2,29...–2,25
ρ	–	0,708	0,718	0,713	0,711...0,715
C_s	–	13,926	19,928	16,927	15,0...18,0
η_{1500}	Па·с	0,261	0,334	0,298	0,275...0,305
ΔH	кДж/кг	1832	1852	1842	1837...1845
T_c	$^{\circ}\text{C}$	1270	1320	1300	
σ_{1500}	мН/м	430	440	435	

В табл. 3–6 представлены результаты сравнительного анализа показателей плавок внутри и вне «интервалов качества», подтверждающие эффективность выбора предложенных критериев стабилизации шлакового режима. По выше разработанному приему установления и оценки шлакового режима произведено сопоставление состава и свойств конечного шлака при устойчивой работе ДП№9 на обычном для нее дутьевом режиме (26% кислорода в дутье с температурой 1060 $^{\circ}\text{C}$, 86 м 3 /т природного газа) в сравнении с режимом плавки с уменьшенным расходом природного газа и кислорода.

Расчетные варианты приведены в табл.7. В последнем (№ 4) варианте расчета предусмотрено имевшее место в реальной практике, кроме сокращения расхода природного газа, некоторое ухудшение качества агломерата (по основности и железу) и окатышей (по железу). Показатели качества шлака для удобства сравнения, приведены в табл.7.

По расходу и составу материалов для каждого из вариантов определили среднее содержание железа в шихте, ее основность, соотношение $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ в оксидном расплаве, а также количество и состав первичного шлака, ряд его свойств. Рассмотренные характеристики изменения численных расчетных показателей состава, физико-химических и физических свойств исходной шихты, первичного и конечного шлака привело к возможности установления важных взаимосвязей, которые хорошо просматриваются, если расположить варианты расчета в приведенном ниже порядке (табл.8).

Из сопоставления расположенных таким образом показателей следует четко проявляющиеся взаимосвязи распределенных по вариантам характеристик исходной шихты, первичного и конечного шлаков с показателями свойств расплавов и качеством чугуна (см. табл.8 и рисунок).

При этом наиболее тесные взаимосвязи проявляются между показателями $(\text{MgO}/\text{FeO})_{\text{ПШ}}$ и $(\rho/\Delta e)_{\text{КШ}}$, принимаемыми в качестве аргументов, и фундаментальными показателями, характеризующими качество конечных шлаков (η_{1450} , σ_{1500} , ΔH), и состояние металлического расплава ($[\text{Si}]/[\text{S}]$).

Таблица 3. Сортировка по качеству в пределах: $-2,323 \leq \Delta e \leq -2,217$; $0,708 \leq \rho \leq 0,718$ показателей продуктов доменной плавки и свойств шлаков ДПП№9 ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог»

	[Si]	[Mn]	[S]	[C]	[Fe]	Lsi	Ls	Производство, т
Среднее	На всем интерв.	0,807	0,393	0,0273	4,38	94,4	57,76	529,43
	В пределах	0,847	0,395	0,0243	4,42	94,4	49,67	552,56
	Вне пределов	0,766	0,391	0,0297	4,35	94,2	64,18	500,37
Средне-квadratic отклонен.	На всем интерв.	0,323	0,65	0,0109	0,106	0,423	27,53	124,32
	В пределах	0,21	0,049	0,0043	0,097	0,308	15,64	115,92
	Вне пределов	0,391	0,076	0,0137	0,104	0,490	33,01	127,63

Таблица 4. Сортировка по качеству в пределах: $-2,323 \leq \Delta e \leq -2,217$; $0,708 \leq \rho \leq 0,718$ показателей продуктов доменной плавки и свойств шлаков ДПП№9 ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог»

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	FeO	(S)	CaO SiO ₂	Al ₂ O ₃ MgO
Среднее	На всем интерв.	39,14	7,20	47,26	5,59	0,402	0,232	1,362	1,207
	В пределах	39,06	7,30	47,34	5,63	0,338	0,197	1,392	1,212
	Вне пределов	39,21	7,13	47,20	5,55	0,452	0,259	1,338	1,204
Средне-квadratic отклонен.	На всем интерв.	1,040	0,478	1,174	0,474	0,188	0,135	0,157	0,061
	В пределах	0,464	0,437	0,514	0,363	0,093	0,050	0,107	0,022
	Вне пределов	1,338	0,503	1,512	0,549	0,227	0,172	0,185	0,079

Таблица 5. Сортировка по качеству в пределах: $-2,323 \leq \Delta e \leq -2,217$; $0,708 \leq \rho \leq 0,718$ показателей продуктов доменной плавки и свойств шлаков ДПП №9 ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог»

	O ₂ , %	Дутье						Влаж- ность, г/м ³	η _{со}	T _{гор} , °C
		R _{пг} , м ³ /мин	R _{дутья} , м ³ /мин	R _{пг} /R _д	T _д , °C	R _д , Ати				
Среднее	На всем интерв.	25,36	518,4	7166	0,0729	1100	3,12	13,12	0,412	2076,1
	В пределах	25,47	522,6	7311	0,0718	1097	3,20	13,03	0,419	2082,7
Средне- квadratic отклонен	Вне пределов	25,29	515,1	7051	0,0737	1103	3,04	13,19	0,407	2070,8
	На всем интерв.	0,442	15,11	627,4	0,0073	53,7	0,27	3,70	0,023	441,998
	В пределах	0,539	14,78	587,4	0,006	44,9	0,22	3,25	0,014	30,249
	Вне пределов	0,334	14,76	642,7	0,0081	60,5	0,28	4,07	0,027	49,204

Таблица 6. Сортировка по качеству в пределах: $-2,323 \leq \Delta e \leq -2,217$; $0,708 \leq \rho \leq 0,718$ показателей продуктов доменной плавки и свойств шлаков ДПП №9 ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог»

	P/K	η ₁₅₀₀ , Па·с	C _s	σ ₁₅₀₀ , мН/м	ΔH, кДж/кг	T _{нп} , °C	L _s /L _s ⁰ , %	T _{хортек.} шлака	
									На всем интерв.
Среднее	В пределах	3,66	0,301	17,61	433,2	1299	1841	84,18	1482
	Вне пределов	3,68	0,309	17,53	430,7	1296	1840	77,12	1480
Средне- квadratic отклонен	На всем интерв.	0,272	0,045	3,207	8,89	22,5	12,9	14,85	7,09
	В пределах	0,279	0,017	1,413	2,92	10,3	3,8	10,11	5,07
	Вне пределов	0,271	0,058	4,138	11,58	28,8	17,1	17,25	8,40

Таблица 7. Характеристика вариантов расчета

Показатели плавки		Номер расчета			
		1	2	3	4
Расход матери- алов в подаче, тн	Кокс	27,50	27,50	28,00	28,00
	Агломерат ГОК	93,0	93,0	104	104
	Окатыши СевГОК	17,0	17,0	6,0	6,0
	Антрацит	4,3	4,3	4,3	4,3
	Известняк	1,5	1,5	1,5	1,5
	Скрап чугунный	3,0	3,0	3,0	3,0
	Шлак обогащенный	5,0	5,0	5,0	5,0
Содержание Fe в агломерате, %		55,1	55,1	55,1	54,0
Основность CaO/SiO ₂ в аглом.		1,24	1,24	1,24	1,20
Содержание Fe в окатышах, %		61,1	61,1	61,1	60,0
Рудная нагрузка		3,758	3,758	3,700	3,700
Пара- метры дутья	Содержание O ₂ , %	25,8	22,4	22,4	22,4
	Расход пр.газа, м ³ /мин	533,3	150,0	150,0	150,0
	Расход дутья, м ³ /мин	7800	8700	8700	8700
	Температура дутья, °C	1060	1050	1050	1050
	Давление дутья, ати	3,35	3,35	3,35	3,35
	Влажность дутья, г/м	12,0	23,9	23,39	23,39
	Длина фурм.зоны, м	2,215	2,405	2,405	2,405
	Температура горения, °C	2096	2150	2150	2150
Степень использования газа, доли		0,428	0,422	0,412	0,405
Расчет- ные показа- тели	Вес чугуна, тн.	67,64	67,55	66,98	65,72
	Расход кокса, кг/т	406,6	407,1	418,0	426,0
	% содержания Si в чугуне	0,91	0,77	0,87	0,84
	% содержания S в чугуне	0,028	0,030	0,021	0,023
	Основность шлака CaO/SiO ₂	1,20	1,18	1,26	1,22
	Отношение Al ₂ O ₃ /MgO	1,37	1,37	1,41	1,40
Свой- ства шлака	Степень дост. равновесия, %	66	72	74	78
	Серопоглот. способн. шл., %	17	15	20	18
	Физ.-хим. эквив. шл., Δe	-2,281	-2,297	-2,221	-2,257
	Стехиометрия шл., ρ	0,713	0,711	0,718	0,715
	Вязкость шл. при 1500°C, Па·с	0,288	0,275	0,331	0,301
	Поверхн. натяжение, мн/м	432	430	440	435
	Энтальпия, кДж/кг	1839	1836	1851	1843
	Температура нач. плавл., °C	1293	1284	1315	1301
Температура нач. крист., °C	1357	1351	1369	1361	

Взаимообусловленность таких связей позволяет определять показатели заданных свойств шлака по его составу ($\rho/\Delta e$, CaO/SiO₂, Al₂O₃/MgO) и наоборот. Наиболее ценным, с нашей точки зрения, является возможность

прогнозировать оптимальный состав шихты (любой компонентности) по отмеченным выше заданным или прогнозируемым показателям $(\text{MgO}/\text{FeO})_{\text{ПШ}}$ и $(\rho/\Delta e)_{\text{КШ}}$.

Таблица 8. Варианты характеристик исходной шихты, первичного и конечного шлаков, качества чугуна

Параметр		№№ вариантов			
		II	I	IV	III
Показатели шихты	$(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO})_{\text{шихты}}$	1,37	1,374	1,4	1,408
	$(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{шихты}}$	1,06	1,069	1,103	1,133
Показатели первичного шлака	$\text{FeO}_{\text{ПШ}}$	21,86	21,8	20,94	20,2
	$(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{ПШ}}$	1,119	1,195	1,233	1,27
	$(\text{MgO}/\text{FeO})_{\text{ПШ}}$	5,048	0,504	4,781	4,634
Показатели конечного шлака	$(\rho/\Delta e)_{\text{КШ}}$	0,309	0,312	0,317	0,323
	$(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{КШ}}$	1,175	1,197	1,219	1,26
	$(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO})_{\text{КШ}}$	1,37	1,37	1,4	1,41
Свойства конечного шлака	вязкость, η_{1450}	0,393	0,412	0,43	0,473
	поверхностное натяжение, σ_{1500}	430	432	435	440
	энтальпия, ΔH	1836	1839	1843	1851
	отношение температур плавления и кристаллизации, $T_{\text{пл}}/T_{\text{кр}}$	0,95	0,953	0,959	0,962
Чугун	$[\text{Si}]/[\text{S}]$	25,67	32,46	36,35	41,48

Некоторые аналитические взаимосвязи выражаются уравнениями ($R \geq 0,85$):

$$\left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}\right)_{\text{КШ}} = -0,0468\left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{ПШ}}^2 + 0,2544\left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{ПШ}} + 1,0807 \quad (1)$$

$$\left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{MgO}}\right)_{\text{КШ}} = -0,0238\left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{ПШ}}^2 + 0,1325\left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{ПШ}} + 1,3093 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}\right)_{\text{шихты}} = 25,231\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)_{\text{КШ}}^2 - 10,525\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)_{\text{КШ}} + 1,9011 \quad (3)$$

$$\left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{MgO}}\right)_{\text{шихты}} = -104,62\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)_{\text{КШ}}^2 + 69,105\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)_{\text{КШ}} + 9,9967 \quad (4)$$

$$\frac{[\text{Si}]}{[\text{S}]} = -8,9032\left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{ПШ}}^2 + 47,943\left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{ПШ}} + 10,558 \quad (5)$$

$$\frac{[\text{Si}]}{[\text{S}]} = -49978\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)_{\text{КШ}}^2 + 32853\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)_{\text{КШ}} - 5291,6 \quad (6)$$

$$\eta_{1450} = -0,0435\left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{ПШ}}^2 + 0,2367\left(\frac{\text{MgO}}{\text{FeO}}\right)_{\text{ПШ}} + 0,3038 \quad (7)$$

$$\eta_{1450} = 127,31\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)_{\text{КШ}}^2 - 74,961\left(\frac{\rho}{\Delta e}\right)_{\text{КШ}} + 11,402 \quad (8)$$

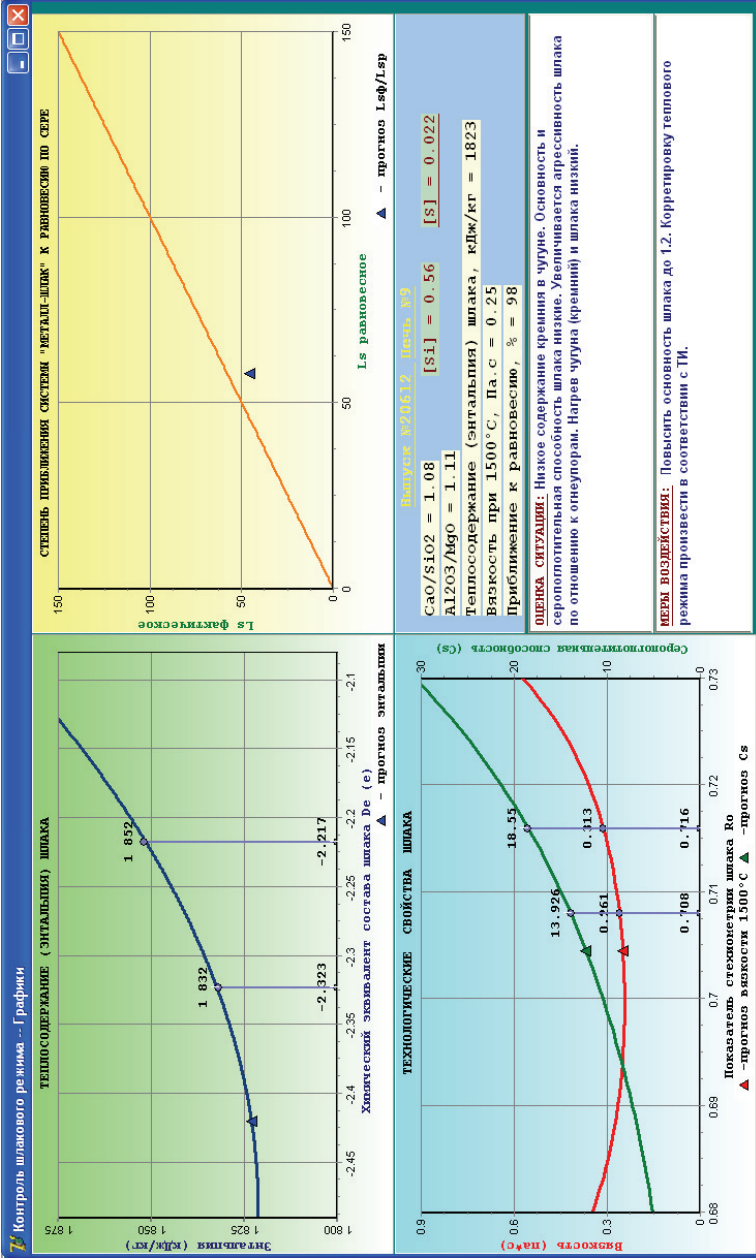


Рисунок. Критериальная оценка качества шлака текущей технологической ситуации

Заключение.

Ранее выполненные [1,2] и настоящие исследования свидетельствуют о глубокой содержательности и тесной взаимообусловленности закономерностей последовательного развития физико–химических превращений и качественных изменений состояния оксидных систем в ходе агрегатных превращений расходных железорудных материалов в конечные продукты доменной плавки, выражаемые рядом наукоёмких критериев (показателей), позволяющих оперативно оценивать, совершенствовать и управлять работоспособностью жидкофазных процессов при изменении технологических условий плавки и качества исходных (планируемых) шихтовых материалов.

1. *Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н.* Выбор рационального состава доменной шихты на основе физико–химического моделирования расплавов. // Сб. тр. МКПК «Металлургия России на рубеже XXI века». – Новокузнецк, 2005. – С.92–99.
2. *Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н.* Физико–химические проблемы формирования расплавов в доменной печи. / Познание процессов доменной плавки. – Днепропетровск. Пороги, 2006. –С. 248–276.
3. *Система* контроля разгара футеровки металлоприемника и формирования продуктов плавки в доменных печах КГГМК «Криворожсталь» / Н.М. Можаренко, Д.Н. Тогобицкая, Г.В. Панчоха и др. // Сб. трудов научно–техн. конференции «Теория и практика производства чугуна». – Кривой Рог. КГГМК «Криворожсталь», 2004. –С.511–514.
4. *Тогобицкая Д.Н., Белькова А.И., Гладков Н.А.* Выбор критериев для оценки влияния шихтовых и технологических условий на межфазное распределение элементов при выплавке чугуна // Сб.науч.тр. «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». –К.: Наукова думка, 2001. –С.46–51.
5. *Автоматизированная система* контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки / Д.Н. Тогобицкая, П.И. Оторвин, А.И Белькова и др. // Металлург. – 2004. –№4. –С.43–46.

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук Э.В.Приходько*