

УДК 669.162.212:669.083.133

И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, Е.А. Белошапка,  
Е.И. Шумельчик, Ю.С. Семенов

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ НА ФУТЕРОВКУ  
МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

*Представлены результаты разработки критерия оценки расплавов на футеровку металлоприемника в нестационарные периоды работы доменной печи, выполненной с использованием метода группового учета аргументов и регрессионного анализа.*

*ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ, ГОРН, ТЕПЛОЕ СОСТОЯНИЕ, КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ НА ФУТЕРОВКУ МЕТАЛЛОПРИЕМНИКА.*

**Постановка проблемы.** Доменщики во всем мире сходятся во мнении, что продолжительность срока службы доменной печи определяется техническим состоянием горна - его футеровки и системы охлаждения горна и лещади [1]. С точки зрения продления кампании доменной печи важным является наличие объективной информации, которая может быть получена с помощью комплексной системы мониторинга состояния горна [2]. Такая система мониторинга состояния горна разработана ИЧМ и реализована в составе АСУ ДП №8 и ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» – система контроля теплового состояния системы охлаждения и остаточной толщины футеровки металлоприемника «Разгар» (далее система «Разгар») [3]. Эта система использует фактические данные, поступающие от установленных в металлоприемнике печи термопар, и рассчитывает фактическую толщину футеровки, что позволяет технологам принимать оперативные меры в соответствии с возникшей ситуацией.

Процессы, протекающие в горне и способствующие иногда его прорыву, пока мало поддаются регулированию. Поэтому, разработка новых критериев, на основе которых возможно осуществлять регулирование теплового состояния горна доменной печи с учетом состояния его футеровки и обеспечения необходимой толщины

---

© Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Белошапка Е.А.,  
Шумельчик Е.И., Семенов Ю.С., 2012

гарнисажа, наличие которого необходимо с точки зрения обеспечения сохранности футеровки и уменьшения тепловых потерь, является актуальной и наукоемкой задачей.

**Цель.** Целью выполнения настоящих исследований является разработка критерия оценки изменения тепловых нагрузок системы охлаждения горна и лещади в зависимости от интенсивности изменения содержания кремния. Выбор и обоснование критерия воздействия расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи обусловлены необходимостью изучения влияния различных факторов в динамике на состояние футеровки с целью обеспечения возможности прогноза ее величины, что особенно важно при возникновении нестандартных ситуаций, в частности вывода печи на нормальный ход после ее аварийной остановки. Такой критерий позволит контролировать составляющую теплового потенциала горна доменной печи, воздействующую на футеровку металлоприемника (комплексный критерий воздействия расплавов на футеровку металлоприемника).

**Основная часть.** Разработка комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника осуществлялась на основе установления функциональных зависимостей технологических параметров и показателей, определяющих тепловое состояние горна, от величины суммарных тепловых нагрузок на холодильники системы охлаждения металлоприемника и температур кладки, по которым рассчитывается остаточная толщина футеровки.

Значительную опасность для сохранности футеровки горна и лещади доменной печи представляют периоды промывок, которые осуществляют в случаях загромождения горна, вызванного ухудшением в горне фильтрующей способности кокса из-за низкой его прочности, либо аварийные ситуации, вызванные вынужденной остановкой печи по причине оползания гарнисажа шахты. Именно один из таких периодов работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» явился основой для исследований, направленных на установление взаимосвязи изменения содержания кремния в чугуне с тепловыми нагрузками, определяемыми системой «Разгар». Приведенные причины разрушения футеровки в значительной степени определяются содержанием кремния в чугуне, принятого в качестве критерия теплового состояния горна доменной печи.

Известно, что тепловое состояние горна, в том числе, определяется химическим составом приходящего в горн шлака. Оценка влияния шлаковых расплавов на тепловое состояние горна печи осуществлялась с помощью полной основности шлака, определяемой в соответствии с выражением  $\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$ , а также с помощью показателя стехиометрии  $\rho$ , основанного на свертке их химического состава.

Одним из контролируемых показателей, по которому оценивают работу газа в печи, является величина выхода колошникового газа. Известно, что при увеличении количества углерода, сжигаемого у фурм (например, в связи с возросшей потребностью тепла), возрастает общее количество газа. То есть, величина выхода колошникового газа прямо пропорциональна содержанию кремния в чугуна. Для исследуемого периода работы печи взаимосвязь величины выхода колошникового газа с содержанием кремния в чугуна имеет обратно пропорциональный характер, что объясняется спецификой восстановления кремния в этот период. Установленная взаимосвязь (таблица 1) послужила основанием использования в качестве одного из аргументов в выражении, описывающем комплексный критерий воздействия расплавов на футеровку, величины выхода колошникового газа.

Как показано в работе [4], для контроля теплового состояния низа печи может быть использовано содержание углерода в чугуна, уровень которого влияет на растворение углерода углеродистых огнеупоров металлоприемника, что определяет стойкость этого важнейшего элемента доменной печи. Химическое растворение углерода кладки чугуна возможно при существовании разницы между концентрацией насыщения чугуна углеродом и фактического его содержания в расплаве. Превалирующее влияние на концентрацию насыщения чугуна углеродом таких факторов, как содержание в расплаве кремния и температуры создает предпосылки к чувствительности фактического содержания углерода в чугуна к температурно-тепловому состоянию горна доменной печи. В результате выполненных в ИЧМ исследований установлено, что для повышения стойкости футеровки металлоприемника доменной печи необходимо поддерживать степень насыщения чугуна углеродом на уровне не ниже 94%.

Надежность соотношений между рассчитываемыми величинами и основными показателями плавки оценивали с помощью взаимно корреляционных функций, описывающих в динамике характер взаимосвязей между значениями отдельных параметров и тепловыми нагрузками системы охлаждения горна и лещади. Определение параметров и показателей доменной плавки, которые могут являться аргументами в выражении критерия теплового состояния низа доменной печи, осуществлялось путем установления тесноты взаимосвязи суммарных тепловых нагрузок системы охлаждения горна и лещади последовательно с каждым из аргументов.

При разработке критерия оценки изменения тепловых нагрузок системы охлаждения горна и лещади в зависимости от интенсивности изменения содержания кремния (комплексного критерия воздействия расплавов на футеровку металлоприемника) во внимание принимались следующие параметры и показатели плавки, контролируемые в АСУ ДП №9 и определяющие тепловое состояние низа доменной печи:

[Si] – среднесуточное содержание кремния в чугунае, ед;

$\Delta Q_{\text{сум}}$  – суммарные тепловые нагрузки на металлоприемник доменной печи, Вт;

$V_{\text{кг}}$  – величина выхода колошникового газа м<sup>3</sup>/мин;

Осн – полная основность шлака  $\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$ , ед;

[C]/C<sub>нас</sub> – отношение содержания углерода в чугунае к углероду насыщенному, ед;

$\rho$  – стехиометрия шлака, ед;

D<sub>gar</sub> – толщина гарнисажа, м.

Содержание углерода в чугунае рассчитывается по эмпирической формуле [4]:

$$[C]=4,6-0,27 \cdot [Si]-0,32 \cdot [P]+0,03 \cdot [Mn]-0,032 \cdot [S],$$

где [Si] – содержание кремния в чугунае, %; [P] – содержание фосфора в чугунае, %; [Mn] – содержание марганца в чугунае, %; [S] – содержание серы в чугунае, %.

Как указывалось выше, на величину тепловых нагрузок оказывает влияние не только химическое тепло, но и шлак, обуславливающий физический нагрев продуктов плавки. Анализ парной корреляции суммарных тепловых нагрузок на холодильники металлоприемника и основности шлака (как комплексного показателя воздействия шлака на футеровку и гарнисаж низа печи)

показал достаточно высокую тесноту их связи (таблица 1). Положительный знак коэффициента корреляции между суммарными тепловыми нагрузками и основностью шлака объясняется превалирующим влиянием основности шлака на нагрев горна (что обуславливает более энергичное восстановление кремния) по сравнению с ее влиянием на изменение концентрации несвязанного кремнезема.

Тесная взаимосвязь  $C/C_{\text{нас.}}$  с тепловыми нагрузками, характеризуемая коэффициентом корреляции  $r_{xy} = 0,71$  (таблица 1), подтверждает чувствительность фактического содержания углерода в чугуне к изменению теплового состояния горна печи.

**Построение критерия.** Для построения критерия использован известный метод группового учета аргументов, который разрабатывается академиком НАН Украины А.Г.Ивахненко и его школой уже более 40 лет, и является типичным методом индуктивного моделирования и одним из наиболее эффективных методов структурно-параметрической идентификации сложных объектов, процессов и систем по данным наблюдений в условиях неполноты информации [5].

Основным параметром оценки теплового состояния низа доменной печи принято содержание кремния в чугуне, что послужило основанием использования его в качестве аргумента в выражении критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника. Кремний с коэффициентом 0,83 определяет размер гарнисажа в нижней части доменной печи при нестабильном ходе печи, а также с коэффициентом корреляции 0,70 определяет тепловые нагрузки на холодильники металлоприемника доменной печи. В результате анализа корреляционной матрицы выбранных параметров (таблица 1) можно выделить не зависимые, либо наименее зависимые от содержания кремния параметры, которые и будут приниматься во внимание при построении критерия. Как показал анализ таблицы 1, такими параметрами являются показатель стехиометрии (коэффициент корреляции с содержанием кремния - 0,1729), а также основность шлака (коэффициент корреляции с содержанием кремния -0,5768). Оба параметра имеют незначительную связь с содержанием кремния в чугуне, но при этом характеризуются достаточной теснотой связи с тепловыми нагрузками. То есть в выражении критерия может быть использована либо величина показателя стехиометрии шлака, либо его основность. Оба эти параметра характеризуют влияние шлакового расплава на металлоприемник.

Таблица 1

Корреляционная матрица выбранных параметров для оценки теплового состояния низа доменной печи на основе анализа суммарных тепловых нагрузок на холодильники металлорейсмента в нестационарный период работы печи

[C]/Снас	[C]/Снас	Si	ρ	Vкг	осн	T теор	Q, МВт	Dgar_ср	ηсо	Si[C]/Снас / (Осн·Vкг)	Si[C]/Снас (Ro·Vкг)	Si[C]/Снас / (ρ·ηсо)
1,0000	1,0000	1,0000										
0,7655	0,7655	1,0000										
-0,2938	-0,2938	0,1729	1,0000									
-0,6188	-0,6188	0,8138	0,3070	1,0000								
-0,5714	-0,5714	0,5768	0,8857	0,5997	1,0000							
-0,5206	-0,5206	0,7402	0,1297	0,6125	0,4494	1,0000						
-0,7103	-0,7103	0,7006	0,4883	0,6575	0,7100	0,3830	1,0000					
0,7434	0,7434	0,8249	0,4346	0,7952	0,7257	0,5417	0,9516	1,0000				
-0,5644	-0,5644	0,8553	0,1563	0,8475	0,5146	0,8000	0,4873	-0,6913	1,0000			
0,6146	0,6146	0,8542	0,0491	0,8786	0,4286	0,6968	0,5692	0,7680	0,9123	1,0000		
0,5912	0,5912	0,8327	0,0036	0,8629	0,3737	0,6710	0,5397	0,7388	0,8954	1,0000		
0,6926	0,6926	0,9329	0,1561	0,8149	0,5436	0,7945	0,6130	0,7895	0,9384	0,9053	1,0000	
0,6849	0,6849	0,9327	0,1019	0,8118	0,4968	0,7900	0,5911	0,7714	0,9410	0,9154	0,8946	1,0000

Следующий этап в построении критерия заключался в выделении параметров, имеющих высокую тесноту взаимосвязи с тепловыми нагрузками и описывающих влияние на металлоприемник других факторов. Как показал анализ таблицы 1, такими параметрами являются:  $C/C_{\text{нас.}}$ ,  $V_{\text{кг}}$  и степень использования газа ( $\eta_{\text{co}}$ ). При этом, такие параметры, как  $V_{\text{кг}}$  и степень использования газа характеризуют работу газа в печи, поэтому в выражении критерия может быть использован один из этих параметров. Как показывает анализ таблицы 1  $V_{\text{кг}}$  по сравнению со степенью использования газа имеет большие коэффициенты корреляции с тепловыми нагрузками на холодильники металлоприемника, что дает основание использовать величину выхода колошникового газа в выражении критерия.

Отношение содержания углерода в чугуне к углероду насыщенному  $-[C]/C_{\text{нас}}$ , хотя и имеет высокую тесноту связи с кремнием, что вызвано определяющей ролью кремния в достижении равновесной концентрации углерода, но не может не учитываться в выражении критерия, так как чувствительно к изменениям теплового состояния низа печи.

Таким образом, основываясь на выполненном обосновании выбора параметров для разработки критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и результатах анализа таблицы взаимной корреляции параметров теплового состояния низа доменной печи (таблица 1), в качестве аргументов критерия выбраны следующие параметры:  $[Si]$  – среднесуточное содержание кремния в чугуне, ед;  $V_{\text{кг}}$  – выход колошникового газа;  $O_{\text{сн}}$  – полная основность шлака  $\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$ , ед.;  $[C]/C_{\text{нас}}$  – отношение содержания углерода в чугуне к углероду насыщенному.

То есть, разрабатываемый критерий будет иметь вид

$$K = f([Si], [C]/C_{\text{нас}}, O_{\text{сн}}, V_{\text{кг}}) \quad (1)$$

Согласно анализу множественной корреляции параметров следует, что их добавление в критерий приводит к увеличению достоверности описания теплового состояния низа доменной печи (коэффициент регрессии с суммарными потерями тепла и с размером гарнисажа увеличивается).

Далее, по методу группового учета аргументов, необходимо выполнить генерацию структур для выбора оптимального критерия, описывающего тепловое состояние низа доменной печи. Были

сгенерированы структуры следующего вида:  $[Si]$ ,  $\frac{1}{V_{к2}}$ ,  $[C]/C_{нас}$ ,  $\frac{1}{Осн}$ ,  $\frac{[Si]}{V_{к2}}$ ,  $\frac{1}{Осн \cdot V_{к2}}$ ,  $[Si] \cdot [C]/C_{нас}$ ,  $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн}$ ,  $\frac{[C]/C_{нас}}{V_{к2}}$ ,  $\frac{[Si]}{Осн \cdot V_{к2}}$ ,  $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{к2}}$ ,  $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн}$ ,  $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{V_{к2} \cdot Осн}$ . Для построения критерия приведем все параметры к нормированным их значениям, т.е.  $[Si]_{норм} = \frac{[Si] - \min([Si])}{\max([Si]) - \min([Si])} + 1$ , и т.д.

Из анализа корреляционной матрицы структур сразу исключим те структуры, которые очень тесно связаны между собой. Наибольшую связь с теплом имеет структура  $\frac{[Si]}{Осн}$ , поэтому исключаем из рассмотрения структуры  $\frac{[Si]}{Осн \cdot V_{к2}}$  и  $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн}$ , так как они очень тесно связаны с  $\frac{[Si]}{Осн}$  ( $r=0,96$ ). Следующим выбираем наиболее комплексный параметр  $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{V_{к2} \cdot Осн}$ . Исходя из результатов парной корреляции структур, исключим следующие структуры из анализа  $[Si] \cdot [C]/C_{нас}$ ,  $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{V_{к2}}$  и  $\frac{[C]/C_{нас}}{V_{к2}}$ . Далее выполним регрессионный анализ для составления критерия на оставшихся 10 структурах  $[Si]$ ,  $\frac{1}{V_{к2}}$ ,  $[C]/C_{нас}$ ,  $\frac{1}{Осн}$ ,  $\frac{[Si]}{V_{к2}}$ ,  $\frac{[Si]}{Осн}$ ,  $\frac{1}{Осн \cdot V_{к2}}$ ,  $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн}$ ,  $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{к2}}$ ,  $\frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{V_{к2} \cdot Осн}$ .

Критерий строится как линейная комбинация всех выделенных структур с подбором весовых коэффициентов по методу наименьших квадратов:

$$K = \alpha_1 \cdot [Si] + \frac{\alpha_2}{V_{к2}} + \alpha_3 [C]/C_{нас} + \frac{\alpha_4}{Осн} + \alpha_5 \frac{[Si]}{V_{к2}} + \alpha_6 \frac{[Si]}{Осн} + \frac{\alpha_7}{Осн \cdot V_{к2}} + \alpha_8 \cdot \frac{[C]/C_{нас}}{Осн} + \alpha_9 \frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{к2}} + \alpha_{10} \frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{к2}},$$

где  $\alpha_i, i = \overline{1..10}$  - вещественные коэффициенты.



После проведения регрессионного анализа мы можем удалить те структуры, которые наименее влияют на критерий:  $[C]/C_{нас}$  – степень влияния 3%,  $\frac{1}{Осн \cdot V_{кг}}$  – степень влияния 1,5% и  $\frac{[C]/C_{нас}}{Осн}$  – степень влияния 0,8%. Далее критерий будем искать в виде

$$K = \alpha_1 \cdot [Si] + \frac{\alpha_2}{V_{кг}} + \frac{\alpha_3}{Осн} + \alpha_4 \frac{[Si]}{V_{кг}} + \alpha_5 \frac{[Si]}{Осн} + \alpha_6 \frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} + \alpha_7 \frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} .$$

После выполнения регрессионного анализа исключаем из рассмотрения те структуры, которые оказывают наименьшее влияние на связь критерия с тепловыми нагрузками, а также параметры, тесно связанные между собой. Так как новый критерий будет носить оценочный характер, а не описательный (т.е. нет прямого соответствия размерности критерия с откликом системы), то свободный член не учитывается. Таким образом, получим критерий оценки воздействия расплавов на футеровку низа доменной печи в виде:

$$K = 0.798 \cdot [Si] + 2.024 \frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} - 0.938 \frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} .$$

После преобразований критерий может быть представлен следующим выражением:

$$K = 0,798 \cdot [Si] + \frac{[C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} [2,024 - 0,938 \cdot [Si] ] \quad (2)$$

Более высокие значения коэффициентов корреляции критерия с тепловыми нагрузками -0,806 и с толщиной гарнисажа 0,866, по сравнению с из значениями, полученными для содержания кремния в чугуна с тепловыми нагрузками на холодильники металлоприемника (-0,70) и с толщиной гарнисажа (0,78), свидетельствуют о том, использование предложенного критерия позволяет комплексно описать воздействие расплавов на футеровку металлоприемника доменной печи.

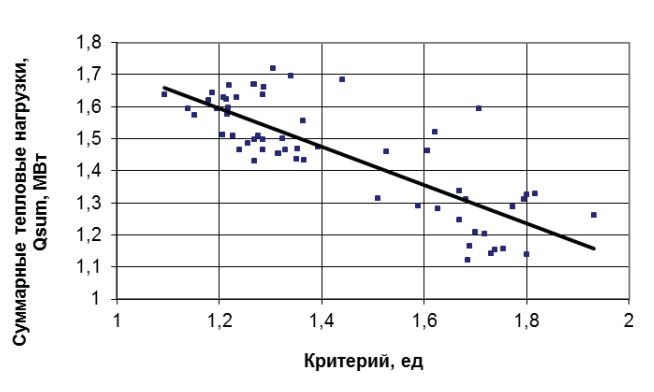
Если представить критерий в упрощенном варианте:

$$K_1 = \frac{[Si] \cdot [C]/C_{нас}}{Осн \cdot V_{кг}} , \quad (3)$$

где  $[Si]$  – относительное изменение содержания кремния в чугуна, ед;  $Осн.$  – относительная основность шлага, ед;  $V_{кг}$  – относительное количество колошниковога газа, ед., то значения коэффициентов корреляции  $K_1$  с тепловыми нагрузками уменьшаются до 0,76 и в этом случае теснота взаимосвязи содержания кремния с тепловыми нагрузками увеличивается.

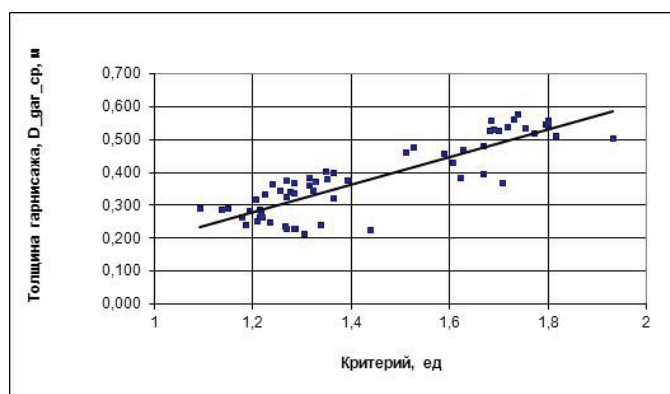
## Перспективы использования комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника в АСУ ДП

Образуемый на рабочей поверхности футеровки горна и лещади металлокерамический слой – гарнисаж является защитой от теплового разгара и эрозионного разрушения. Поэтому поддержание рациональной толщины гарнисажа в пределах 0,2 – 0,3 м является важной задачей с позиции защиты футеровки и продления кампании печи. На основе предложенного комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника для исследуемого периода работы ДП №9 определена зависимость суммарных тепловых нагрузок от критерия (рисунок 1), а также зависимость толщины гарнисажа от величины критерия  $K$ , представленная на рисунке 2. На основе представленной на рисунке 2 зависимости могут быть определены граничные условия изменения комплексного критерия, позволяющие ограничить негативное воздействие расплавов на футеровку металлоприемника, при этом сохранив требуемую толщину гарнисажа. Как следует из рисунка 2, граничные условия изменения комплексного критерия могут быть представлены в виде:  $1,0 \leq K \leq 1,2$ . Полученные для условий нестационарной работы ДП №9 граничные условия изменения комплексного критерия могут быть уточнены в результате дальнейших исследований.



$$R_{x,y} = -0,806$$

Рисунок 1 – Зависимость суммарных тепловых нагрузок от комплексного критерия  $K$



$$R_{x,y} = 0,866$$

Рисунок 2 – Зависимость толщины гарнисажа от величины комплексного критерия  $K$

Как показали результаты исследований, между толщиной гарнисажа и критерием существует достаточно тесная взаимосвязь, характеризующая коэффициентом корреляции 0,87. Основываясь на этой взаимосвязи, может быть предложен следующий метод прогнозирования толщины гарнисажа металлоприемника в условиях работы печи, связанных с промывками горна, либо в нестационарных условиях, вызванных проплавлением сошедшего со стен шахты печи гарнисажа. Метод основан на использовании разработанного ранее способа прогнозирования содержания кремния в чугунах и включает [6]:

1. Прогноз содержания кремния в чугунах за 3 часа до выпуска и, соответственно, прогноз с высокой достоверностью 0,8 величины комплексного критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника.

2. Определение с достоверностью 0,87 (согласно зависимости, представленной на рисунке 2) значения толщины гарнисажа металлоприемника.

3. Сопоставление прогнозируемой величины критерия с граничными условиями его изменения и принятие соответствующих технологических решений, направленных либо на дальнейший разогрев горна, либо на его стабилизацию на достигнутом уровне.

Использование предложенного метода позволит избежать чрезмерных промывок, вызывающих избыточное расплавление гарнисажа, которое приводит к дальнейшему разрушению футеровки, что в свою очередь влечет уменьшение продолжительности кампании печи, а в критическом случае приводит к прорыву горна. Кроме контроля сохранности футеровки, установленные взаимосвязи содержания кремния в чугунах с тепловыми нагрузками системы охлаждения горна и лещади могут быть использованы при оптимизации массы промывочных порций кокса, что в конечном итоге будет способствовать его экономии. Как показывает зависимость толщины гарнисажа от комплексного критерия, представленная на рисунке 2, рациональной толщине гарнисажа, изменяющейся в диапазоне от 0,2 до 0,3 м, соответствуют минимальные значения критерия оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника печи.

При установившейся работе печи, когда футеровка металлоприемника не испытывает возмущений, приводящих к ее разрушению, предложенный критерий не может быть использован.

**Выводы.** Разработан новый целевой критерий оценки воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и на его основе метод прогнозирования толщины гарнисажа металлоприемника в условиях работы печи, связанных с промывками горна, либо в нестационарных условиях, вызванных проплавлением сошедшего со стен шахты печи гарнисажа. Использование предложенного метода позволит избежать чрезмерных промывок, вызывающих избыточное расплавление гарнисажа, которое приводит к дальнейшему разрушению футеровки, что в свою очередь влечет уменьшение продолжительности кампании печи, а в критическом случае приводит к прорыву горна.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савчук Н.А. Доменное производство на рубеже XXI века /Н.А. Савчук, И.Ф. Курунов - АО «Черметинформация», Новости черной металлургии за рубежом. Часть II. Приложение 5, 2000. – 42 с.
2. Увеличение продолжительности кампании доменных печей /Новости черной металлургии за рубежом. - 2006. - №2 – С. 23 – 27.
3. Система контроля разгара футеровки металлоприемника и формирования продуктов плавки в доменных печах КГГМК «Криворожсталь»: Теория и практика производства чугуна, труды международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь», /Н.М. Можаренко, Д.Н. Тогобицкая, Г.В. Панчоха и др. - 2004. - С. 511–514.
4. Взаимосвязь степени насыщения чугуна углеродом и разгара футеровки металлоприемника доменной печи /Н.М. Можаренко, А.А. Параносенков, Г.В. Панчоха и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. науч. тр. ИЧМ – Вып. 12 –Днепропетровск ИЧМ, 2006. – С. 77-84.
5. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / А.Г. Ивахненко. - Киев: Техніка, 1975. - 311 с.
6. Прогнозирование теплового состояния горна доменной печи /В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Ю.С. Семенов, С.Т. Шулико, Е.И. Шумельчик // Сталь, 2009, № 5. – С. 7–9.