

**И.Г.Товаровский**

## **НОРМАТИВНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ НА РАСХОД КОКСА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ**

*Институт черной металлургии НАН Украины*

Разработан методический инструмент по оценке влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность. Новый документ является развитием ранее разработанного и используемого в металлургии руководящего отраслевого документа «Доменные печи. Нормативы расхода кокса». На основе результатов выполненных аналитических и экспериментальных исследований, а также обобщения опыта работы приведена нормативная оценка влияния технологических параметров на расход кокса и производительность доменной печи.

**Ключевые слова:** доменная плавка, нормативы, расход кокса, опыт работы, исследования

**Современное состояние вопроса.** Под нормативной оценкой влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность доменной печи понимается определение величин изменений расхода кокса и производительности при изменении отдельных параметров плавки и их совокупности. Наличие такой оценки необходимо для выполнения оперативного анализа технологии, результативность которого зависит от полноты и качества используемой информации.

Использование в течение многих лет для этих целей известного перечня технологических факторов и установленного эмпирически влияния каждого из них на расход кокса и производительность показало неоднозначность во многих случаях этого влияния и необходимость создания системной методики. Разработка такой методики начата в ИЧМ по заданию Минчермета СССР в начале 80-х годов прошлого века.

После ряда обсуждений на предприятиях и в институтах отрасли методика была рассмотрена на Всесоюзных совещаниях доменщиков, после чего утверждена в качестве отраслевого директивного документа [1-4]. В ходе использования этого документа в последующие годы он непрерывно совершенствовался путем уточнения отдельных позиций на основе новых аналитических и экспериментальных исследований [5-7] и продолжает использоваться в настоящее время на предприятиях России, Украины и Казахстана. В обновленном виде отраслевой методический документ содержит уточнения в следующих позициях основной табличной формы (табл.1): 6, 7, 13, 16, 18, 22, 26.

В ходе изучения влияния отдельных факторов на показатели доменной плавки выявлена его зависимость от комплекса сопутствующих условий. Поэтому оценка этого влияния не может быть всегда однозначной и в значительной мере зависит от поставленной задачи.

**Постановка задачи.** В случае изолированной оценки отдельного фактора необходимо учитывать весь комплекс связанных с ним условий. При сравнении различных периодов работы доменных печей, когда отдельные компоненты данного фактора уже учтены другими факторами, величина его влияния ограничивается основными компонентами во избежание «двойного учета».

При оперативном анализе изменений показателей плавки часто используются сводками нормированных коэффициентов подсчета расхода кокса и производительности печи, составленными по различным данным. Недостатком таких сводок является невязанность коэффициентов, приводящая к погрешностям в их абсолютных значениях и повторному учету отдельных компонентов эффектов при пересчете по различным факторам. Для правильного учета факторов при анализе показателей доменной плавки необходимо использовать специальные приемы, которые являются составной частью методики, обоснование и содержание которой излагается ниже.

**Изложение основных результатов исследования.** Методика предназначена для использования при анализе изменений удельного расхода кокса и производительности доменных печей под влиянием изменений технологических параметров доменной плавки. Такой анализ выполняется при сопоставлении периодов работы доменных печей с различными значениями технологических параметров доменной плавки, определяющими величины удельного расхода кокса и производительности (пофакторный анализ). В основе этого анализа лежат количественные соотношения между изменившимися параметрами (факторами) и удельным расходом кокса (производительностью доменных печей), которые определяются эмпирически либо аналитически.

Для получения надежных результатов на базе эмпирического материала требуется увязка его единой логически непротиворечивой основой. Такой основой являются результаты аналитического изучения процесса, которые обретают реальное содержание в контакте с эмпирическим материалом.

На основе установленных связей выполнили анализ имеющихся опытных данных, полученных в различных условиях, и выбрали наиболее надежные из них. Обобщенные данные практики использовали для корректировки величин, полученных аналитически. В табл.1 даются сводка технологических факторов и величины их влияния на удельный расход кокса и производительность доменных печей, установленные изложенным способом, а также ссылки на основные источники, содержащие наиболее характерные результаты фактического влияния технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменных печей.

Приведенные в табл.1. факторы сгруппированы в три категории: шихтовые (п.п.1-14, 26), газо-дутьевые (п.п.15-20, 25) и организационные (п.п. 22-24).

Таблица 1. Влияние технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи

п. №	Факторы и единицы измерения	+ увеличение, - уменьшение		Источники
		расход кокса, %	производительность, %	
1	Повышение содержания железа на каждый 1 % (во всей шихте без кокса и CO <sub>2</sub> флюса)			[9,10]
	в пределах до 50 %	-1,4	+2,4	
	в пределах 50-55 %	-1,2	+2,0	
	в пределах 55-60 %	-1,0	+1,7	
	То же, снижение количества шлака на каждые 10 кг/т чугуна	-0,35	+0,6	
2	Повышение расхода чистых металлодобавок (100 % Fe) на каждые 10 кг/т чугуна	-0,4	+0,6	[8,11,12]
3	Уменьшение расхода сырого известняка на каждые 10 кг/т чугуна	-0,5	+0,5	[8, с. 67-72]
	То же, доломитизированного	-0,4	+0,4	
4	Уменьшение содержания фракции 5-0 мм в железорудной шихте на каждый 1 %	-0,5	+1,0	[13]
5	Уменьшение содержания золы в коксе на каждый 1 %	-1,3	+1,3	[14]
6	Уменьшение содержания серы в коксе			[14]
	на каждую 0,1 % при [S] = 0,05 %	-0,18	+0,18	
	при [S] = 0,04 %	-0,22	+0,22	
	при [S] = 0,03 %	-0,27	+0,27	
	при [S] = 0,02 %	-0,38	+0,38	
	при [S] = 0,01 %	-0,71	+0,71	
7	Повышение прочности кокса, %/‰:			[14] [15-18]
	7.1. по показателю M <sub>25</sub>	-0,6	+0,6	
	7.2. по показателю CSR	-0,7	+0,7	
8	Уменьшение истираемости кокса по показателю M <sub>10</sub> на кажд. 1 % (‰/‰)	-2,8	+2,8	[14]
9	Уменьшение содержания в коксе фракции +80 мм на кажд. 1 % (‰/‰)	-0,2	+0,2	[14]
10	Уменьшение содержания кремния в чугуне на каждый 0,1 %	-1,2	+1,2	[19]
11	Уменьшение содержания марганца в чугуне на каждый 0,1 %			
	при 30 % Mn в выводимой руде	кг/т чугуна -1,17	% +0,22	
	при 20 % Mn в выводимой руде	-1,76	+0,35	
	при 15 % Mn в выводимой руде	-2,27	+0,44	

12	Уменьшение содержания фосфора в чугуне на каждый 0,1 %	-0,6	+0,6	
13	Повышение содержания серы в чугуне:			
	13.1. В случае прихода серы 10 кг/т:	(кг/т)	%	
	от 0,04 до 0,05 %	-3,3	+0,6	
	от 0,03 до 0,04 %	-5,5	+1,1	
	от 0,02 до 0,03 %	-11	+2,0	
	от 0,01 до 0,02 %	-33	+6,5	
	13.2. В случае прихода серы 4 кг/т:			
	от 0,04 до 0,05 %	-1,3	+0,25	
	от 0,03 до 0,04 %	-2,2	+0,4	
	от 0,02 до 0,03 %	-4,4	+0,8	
от 0,01 до 0,02 %	-13,3	+2,5		
14	Повышение температуры дутья на каждые 10 °С в диапазонах:			
	800-900 °С	-0,50	+0,50	[20 - 22]
	900-1000 °С	-0,40	+0,40	
	а) при концентрации кислорода в дутье до 25 %			[20 - 22]
	1000-1100 °С	-0,30	+0,30	
	1100-1200 °С	-0,28	+0,28	
	1200-1300 °С	-0,25	+0,25	
	1300-1400 °С	-0,22	+0,22	
	б) при концентрации кислорода в дутье 25-35 %			[20 - 22]
	1000-1100 °С	-0,25	+0,25	
	1100-1200 °С	-0,20	+0,20	
	1200-1300 °С	-0,20	+0,20	
	1300-1400 °С	-0,18	+0,18	
	в) при концентрации кислорода в дутье 35-40 %			[20 - 22]
	1000-1100 °С	-0,20	+0,20	
	1100-1200 °С	-0,18	+0,18	
	1200-1300 °С	-0,16	+0,16	
	1300-1400 °С	-0,14	+0,14	
15	Уменьшение влажности дутья на каждый 1 г/м <sup>3</sup> при расходе дутья:			
	1500-1600 м <sup>3</sup> /т	-0,20	+0,14	
	1000-1100 м <sup>3</sup> /т	-0,15	+0,06	
16	Обогащение дутья кислородом на каждый 1 % (абс.) при концентрации:			[23-33]
	до 25 %	+0,50	+2,0	
	25-30 %	+0,80	+1,7	
	30-35 %	+1,10	+1,4	
	35-40 %	+1,40	+1,1	

17	Коэффициент замены кокса коксовым газом при расходе:			[23 - 33]
	до 200 м <sup>3</sup> /т	0,45кг/м <sup>3</sup>		
	200-300 м <sup>3</sup> /т	0,4 кг/м <sup>3</sup>		
18	Коэффициент замены кокса природным газом при расходе:			[23 - 33]
	до 100 м <sup>3</sup> /т	0,8 кг/м <sup>3</sup>	-	
	100-150 м <sup>3</sup> /т	0,6 кг/м <sup>3</sup>	-	
	150-200 м <sup>3</sup> /т	0,4 кг/м <sup>3</sup>	-	
19	Коэффициент замены кокса мазутом	1,2 кг/кг	-	[23 – 33]
20	Коэффициент замены кокса измельченными углями:			[23 - 33]
	антрацитом и тощим с содержанием золы до 10 %	0,9 кг/кг	-	
	то же, с содержанием золы 10-20 %	0,8 кг/кг	-	
	газовым, с содерж-ем золы 10-20 %	0,8 кг/кг	-	
21	Повышение давления газов под колошником на каждые 10 кПа в диапазоне 100-200 кПа избыточного давления	-0,20	+1,0	[34]
22	Уменьшение времени простоев на каждый 1 %*	-0,50	+1,5	[35-37]
23	Уменьшение времени тихого хода на каждый 1 %	-0,50	+1,0	[35-37]
24	Уменьшение случаев задержки выпуска чугуна на каждый 1 % при средней длительности задержки 0,5 интервала времени между смежными выпусками**	-0,05	+0,1	[38]
25	Увеличение степени форсирования плавки с повышением перепада давления газов на каждый 1 % в пределах до граничного значения	-	+0,50	
	То же, сверх граничного значения	+0,2	+0,30	
26	Замещение кокса антрацитом, кг/кг	0,8 – 1,0	-	[39]

\*В случае кратковременных простоев. При длительных остановках расход кокса изменяется незначительно, а производительность – на 1% на каждый 1% времени простоев.

\*\* При другой средней длительности задержки выпусков указанные величины изменяются пропорционально

При использовании данных таблицы для сопоставления периодов работы доменных печей с различными параметрами и пофакторного анализа удельного расхода кокса и производительности предполагается линейность и автономность влияния каждого фактора. В действительности влияние факторов на удельный расход кокса и производительность нелинейно и неаддитивно.

Характер зависимостей определяется общими принципами взаимосвязи параметров доменной плавки [2,5,6], кратко изложенными в конце настоящей статьи, исходя из которых оценка величины влияния каждого параметра на расход кокса и производительность должна производиться в зависимости от абсолютного значения величины параметра (чем оно выше, тем меньше величина влияния), сочетания с другими параметрами (одни усиливают, другие – ослабляют влияние), общего уровня совершенства процесса (чем он выше, тем меньше величина влияния всех параметров). Поэтому диапазоны реальных значений ряда параметров разбиты на интервалы, в пределах которых без большой погрешности связи можно считать линейными, а величины влияния некоторых факторов на расход кокса и производительность доменных печей даются в зависимости от среднего уровня других факторов.

Ниже приводятся особенности формирования и учета каждой категории факторов.

### **Шихтовые параметры**

Поскольку содержание железа в шихте зависит от основности, следует оперировать обобщенным показателем – содержанием железа в условно-самоплавкой шихте. Оно определяется как количество железа во всех компонентах (в том числе известняки, металлодобавки, шлаковые добавки и т.д.), кроме кокса, деленное на общий расход этих компонентов без  $\text{CO}_2$  карбонатов. Таким образом, расход сырого флюса входит в сумму компонентов шихты за вычетом содержащегося в нем  $\text{CO}_2$ .

Указанный показатель содержания железа позволит сравнить богатство шихт с разной основностью и исключить имеющую место неоднозначность существующего показателя содержания железа в шихте. Содержание железа в условно-самоплавкой шихте однозначно связано с выходом шлака на 1 т чугуна. Поэтому в ходе анализа можно оперировать только одной из указанных величин.

Повышению содержания железа на каждый 1 % при одинаковой окисленности соответствует уменьшение количества шлака на величину:

$$\Delta \text{Ш} = 100 \cdot \text{Fe}_\text{ч} / (\% \text{Fe})^2, \text{ кг/т чугуна.}$$

где:  $\text{Fe}_\text{ч}$  – количество железа в чугуне, кг/т чугуна; % Fe – среднее содержание железа в условно-самоплавкой шихте, %.

При  $\text{Fe}_\text{ч} = 940$  кг/т и % Fe = 50 % величина  $\Delta \text{Ш} = 37,6$  кг/т

$\text{Fe}_\text{ч} = 940$  кг/т и % Fe = 55 % величина  $\Delta \text{Ш} = 31$  кг/т

$\text{Fe}_\text{ч} = 940$  кг/т и % Fe = 60 % величина  $\Delta \text{Ш} = 26$  кг/т.

При среднем содержании железа в шихте 50 % изменение его на 1 % приводит к изменению количества шлака в 1,4 раза большему, чем в случае среднего содержания железа 60 %. По этой причине экономия кокса и прирост производительности на каждый дополнительный 1 % железа в шихте, полученные в условиях Украины, в 1,4 раза выше, чем в условиях России. В значительной мере по этой же причине эффективность увеличения содержания железа за счет ввода в шихту окатышей в ряде случаев

ниже, чем в случае повышения содержания железа в агломерате. Уменьшение выхода шлака на каждые 10 кг/т чугуна способствует экономии кокса 0,35 % и приросту производительности 0,6 % независимо от общего его количества и содержания железа в шихте.

Расход металлодобавки влияет на расход кокса через содержание железа в шихте (количество шлака) (п.1) и расход тепла и углерода на прямое восстановление, изменяющийся под влиянием изменения степени металлизации, которая определяется как отношение количества металлического железа в шихте ко всему железу шихты. Поскольку учет содержания железа в шихте предусмотрен отдельной статьёй (п.1), то расходом чистых металлодобавок (п.2) учитывается только изменение степени металлизации шихты. При необходимости изолированной оценки влияния металлодобавок, когда изменение количества шлака отдельно не учитывается, следует учесть его (3÷5 кг/т чугуна шлака на каждые 10 кг/т чугуна металлодобавок) в общей величине эффективности. Тогда экономия кокса от повышения расхода чистых металлодобавок (100 % Fe) на каждые 10 кг/т чугуна составит 0,6 %, а прирост производительности – 0,8 %. Для загрязненных металлодобавок эффективность пропорциональна содержанию в них железа (кг/кг).

Степень офлюсования шихты влияет на расход кокса и производительность через содержание железа и расход сырого флюса. Первый фактор учитывается при подсчете изменения содержания железа в условно-самоплавкой шихте, второй следует учитывать отдельно (п. 3). Изложенный способ учета характеристики шихты исключает необходимость ввода такого параметра, как «доля агломерата и окатышей», так как последний влияет на расход кокса через выход шлака (содержание железа), расход флюса (п. 3) и содержание мелочи в шихте (п. 4).

Материальные характеристики кокса (п. 5, 6) и состав чугуна (п.п. 10÷13) влияют на расход кокса как непосредственно через тепловой баланс и баланс углерода, так и через изменения количества шлака и сырого флюса. Поскольку суммарное изменение количества шлака (содержания железа) и сырого флюса учитывается отдельно (п.п. 1, 3), величины влияния факторов на расход кокса и производительность по п.п. 5, 6, 10÷13 включают только эффект непосредственного влияния факторов на тепловой баланс и баланс углерода.

При необходимости оценить влияние каждого из рассматриваемых факторов в изолированном виде, когда суммарное изменение количества шлака и сырого флюса отдельно не учитывается, следует учесть это изменение в общей величине влияния каждого фактора на расход кокса и производительность (табл. 2; числитель – при отсутствии в шихте сырого флюса или постоянном его расходе, знаменатель – при изменении количества СаО в шихте изменением расхода сырого флюса).

Влияние прочности (п.7) и истираемости (п.8) кокса приводится с учетом имеющейся взаимной связи между показателями  $M_{25}$  и  $M_{10}$ . Ранее

прочность кокса характеризовали только показателем  $M_{25}$ , который отражает свойства кокса в условиях шахты, теперь добавлен показатель послереакционной прочности CSR, отражающий свойства кокса в горне.

При необходимости изолированной оценки влияния каждого из этих показателей следует оценивать увеличение на каждый 1 % показателя  $M_{25}$  экономией кокса и приростом производительности доменной печи 1,5 %, а показателя  $M_{10}$  – значениями, приведенными в табл. 1.

Таблица 2. Изолированная оценка влияния факторов на удельный расход кокса и производительность печи

Факторы и единицы измерения	+ увеличение, - уменьшение	
	расход кокса, %	производительность, %
Уменьшение содержания золы в коксе на 1 %	-1,4/-1,8	+1,4/+1,8
Уменьшение содержания серы в коксе		
на каждый 0,1 % при [S] = 0,05 %	-0,18/-0,57	+0,18/+0,57
при [S] = 0,04 %	-0,22/-0,70	+0,22/+0,70
при [S] = 0,03 %	-0,27/-0,92	+0,27/+0,92
при [S] = 0,02 %	-0,38/-1,36	+0,38/+1,36
при [S] = 0,01 %	-0,71/-2,66	+0,71/+2,66
Уменьш-е содержания кремния в чугуна на 0,1 %	-1,2/-1,0	+1,2/+1,0
Уменьш-е содерж-я марганца в чугуна на 0,1 %	кг/т чугу.	%
при 30 % Mn в выводимой Mn-руде	-1,17/-1,66	+0,22/+0,33
при 20 % Mn в выводимой Mn-руде	-1,76/-2,89	+0,35/+0,42
при 15 % Mn в выводимой Mn-руде	-2,27/-3,78	+0,44/+0,61
Повышение содержания серы в чугуна: в случае прихода серы с шихтой 10 кг/т	кг/т чугу.	%
от 0,04 до 0,05 %	-3,3/-13,0	+0,6/+2,4
от 0,03 до 0,04 %	-5,5/-21,7	+1,1/+4,3
от 0,02 до 0,03 %	-11/-43,3	+2,0/+7,19
от 0,01 до 0,02 %	-33/-130,0	+6,5/+25,6
в случае прихода серы с шихтой 4 кг/т		
от 0,004 до 0,05 %	-1,3/-5,1	+0,25/+0,99
от 0,003 до 0,04 %	-2,2/-8,7	+0,4/+1,58
от 0,002 до 0,03 %	-4,4/-17,4	+0,8/+3,15
от 0,001 до 0,02 %	-13,3/-52,4	+2,5/+9,85

**Дутьевые параметры.** Влияние дутьевых параметров на удельный расход кокса и производительность печи характерно большой нелинейностью и зависимостью от многих условий. Поэтому коэффициенты пересчета даны по диапазонам значений параметров и в зависимости от значе-



ний других параметров. В наибольшей мере это относится к температуре дутья, расходу природного газа и кислорода.

Влияние концентрации кислорода в дутье на расход кокса неоднозначно и зависит от исходных условий. При работе на холодном или слабонагретом атмосферном дутье добавка кислорода способствует небольшой экономии кокса. В условиях высоконагретого дутья с большой концентрацией кислорода и малым расходом углеводородов дополнительное обогащение дутья кислородом без добавления углеводородов приводит к перерасходу кокса. Второй из указанных режимов характерен для большинства современных доменных печей, использующих кислород при нагреве дутья до 1000-1300<sup>0</sup>С. Некоторый перерасход кокса (п.16) имеет место на этих печах, несмотря на снижение удельных теплотерь при обогащении дутья кислородом (без добавки природного газа) при практически неизменной степени прямого восстановления. В настоящей новой версии методического документа указанная величина перерасхода кокса (п. 16) показана более высокой (%/%), чем в руководящем документе 1987 года. Приведенные данные опираются на результаты специально выполненных исследований [5-7].

Коэффициенты замены (КЗ) кокса газообразными и жидкими холодными дутьевыми добавками зависят от всех параметров, определяющих характер температурного поля в печи (п.п.14-19). В общем случае расчетные значения КЗ тем больше, чем выше исходное значение теоретической температуры горения. Для значения этой температуры 2000<sup>0</sup>С КЗ кокса природным газом составляет 0,9-1,0 кг/м<sup>3</sup> при небольших расходах, снижаясь до 0,7-0,3 кг/м<sup>3</sup> при расходах 150-200 м<sup>3</sup>/т. Аналогично КЗ для коксового газа составляет 0,40-0,45 кг/м<sup>3</sup>. КЗ кокса мазутом мало зависит от общего расхода и составляет 1,4 кг/кг. КЗ кокса измельченным углем определяется, главным образом, его составом и равен для антрацита 1,0 кг/кг, а для газовых и тощих углей 0,8-0,9 кг/кг.

Приведенные величины КЗ кокса могут быть получены в случае полного превращения углеводородов и твердого углерода у фурм. При существующих способах их ввода и распределения по фурмам часть углеводородов подвергается пиролизу с выделением сажи, а угольные частицы сгорают не полностью. Учитывая это, практические величины КЗ кокса приняты на 15-20 % ниже предельных для природного газа, мазута и углей (п.п. 18, 19, 20). Для коксового газа указанное влияние незначительно (п.17). Повышение интенсивности плавки при форсированном ходе процесса приводит к увеличению удельного расхода кокса. Величина перерасхода кокса от повышения интенсивности плавки тем больше, чем ниже удельный расход кокса и меньше его прочность, больше мелких фракций в шихте и выше концентрация кислорода в дутье, а также меньше время пребывания шихтовых материалов в печи.

В случае повышения интенсивности за счет факторов, снижающих удельный расход кокса, например, отсева мелочи из шихты, совместное

увеличение расхода кислорода и природного газа и др., перерасход кокса в явном виде не наблюдается, а уменьшается общая величина экономии. В этом случае влияние интенсивности плавки не требует отдельного учета, так как является компонентом суммарной величины изменения расхода кокса от воздействия основного фактора. Отдельный учет влияния интенсивности плавки требуется в случае изменений напряженности газодинамического режима, выражающихся в изменении перепада давления газов в печи (п.25). Это происходит за счет изменений объема газов в единицу времени при постоянной газопроницаемости столба шихты, а также за счет изменений газопроницаемости столба шихты при одинаковом объеме газов в единицу времени. При этом увеличение перепада давления и соответствующее увеличение интенсивности плавки приводит к повышению производительности печи. Превышение некоторого граничного значения перепада давления приводит к возрастанию расхода кокса и соответствующему замедлению роста производительности печи. Граничные значения перепада давления для доменных печей разного объема ориентировочно составляют:

$$1000 \div 1242 \text{ м}^3 - 130 \text{ кПа};$$

$$1300 \div 1800 \text{ м}^3 - 140 \text{ кПа};$$

$$2000 \div 2300 \text{ м}^3 - 150 \text{ кПа};$$

$$2700 \div 3200 \text{ м}^3 - 160 \text{ кПа};$$

$$5000 \text{ м}^3 - 180 \text{ кПа}.$$

Для конкретных условий они должны быть уточнены по выражению:

$$\Delta P_{\text{гр}} = \Delta P_{\text{гр}}^0 \cdot \frac{450}{\kappa}, \quad \text{где } \kappa - \text{расход кокса, кг/т.}$$

### **Колебания состава шихты и параметров плавки**

Приведенные в табл. 3 данные предназначены для изолированной оценки каждого из факторов, когда суммарное изменение количества шлака, содержания кремния в чугуне и перепада давления газов в столбе шихты отдельно не учитывается. При оценке влияния комплекса параметров (табл.1), когда влияние изменения количества шлака (содержания железа в шихте), содержания кремния в чугуне и перепада давления в печи учитывается суммарно (независимо от определяющих факторов), отдельный учет влияния колеблемости состава шихты и параметров плавки не требуется.

Таблица 3. Влияние колебаний параметров на расход кокса и производительность печи

Снижение среднеквадратичного отклонения факторов	Экономия кокса, %	Прирост производительности, %
Влажности кокса на 0,1 %	0,28	0,42
Погрешности дозирования шихты на 0,1 %	0,28	0,42
Зольности кокса на 0,1	0,36	0,54

Содержания железа в шихте на 0,1 %	0,20	0,29
Основности шихты на 0,01 ед.	0,13-0,19	0,22-0,33*
Температуры дутья на 10°C	0,08	0,13
Влажности дутья на 0,1 %	0,45	0,67
Расхода природного газа на 1 м <sup>3</sup> /т чугуна	0,42	0,63
Концентрации кислорода в дутье на 0,1 %	-	0,22

\* Меньшие значения при выходе шлака 300-350 кг/т чугуна, большие – при 450-500 кг/т чугуна.

### Организационные факторы

К организационным факторам технологии относятся остановки и тихий ход доменных печей, ритмичность загрузки шихты и выпуска продуктов плавки, а также связанная с этими факторами стабильность хода процесса. Влияние этих факторов на удельный расход кокса и производительность печи зависит от характера переходных процессов, вызванных ими, и поэтому не всегда однозначно. Пока указанное влияние оценивается эмпирически, главным образом, на основе статистической обработки производственных данных (п.п.22-24).

### Общие замечания и принципы

Влияние большинства рассмотренных выше факторов достаточно изучено и в значительной мере поддается количественному анализу в рамках единой логической схемы доменной плавки. Влияние некоторых из них, изученных недостаточно, пока приходится рассматривать изолированно, на основе обобщения эмпирических данных. К ним относятся механические и физико-химические свойства сырья и кокса, газораспределение в печи, особенности и динамика изменения элементов профиля печи (и соответственно теплотеря), процессы в горне, миграция щелочей и сажи.

Указанные факторы, оказывая непосредственное влияние на удельный расход кокса и производительность печи, находятся в тесной связи с другими параметрами плавки и могут изменять характер влияния этих параметров на показатели процессов. Для достоверной их оценки требуется дальнейшее изучение и математическое описание процессов. На данном этапе используются лишь некоторые эмпирические данные (п.п. 4, 7, 8, 22-24). Сделаны серьезные шаги в количественной оценке влияния физико-химических свойств сырья и кокса, газораспределения в печи и теплотеря [6].

При оценке влияния различных факторов, особенно малоизученных, полезно руководствоваться общими принципами взаимосвязи параметров доменной плавки [2,5,6], исходя из которых оценка величины влияния каждого параметра на расход кокса и производительность должна производиться в зависимости от абсолютного значения величины параметра (чем оно выше, тем меньше величина влияния), сочетания с другими параметрами (одни усиливают, другие – ослабляют влияние), общего уровня

совершенства процесса (чем он выше, тем меньше величина влияния всех параметров). Сущность в следующем.

**Принцип затухания:** *Максимальный эффект от применения каждого мероприятия по совершенствованию доменной плавки достигается при условиях, противоположных тем, к которым ведет данное мероприятие.*

По мере приближения к режиму, соответствующему полной реализации данного мероприятия, эффективность его на каждом шаге реализации снижается и в пределе может быть нулевой или отрицательной.

Поскольку каждый шаг в осуществлении отдельного мероприятия сдвигает условия протекания процессов в печи в сторону режимов, при которых дальнейшие шаги будут менее эффективными, сочетание данного мероприятия с другим, обеспечивающим смещение условий протекания процессов в противоположную сторону, повышает эффективность обоих мероприятий. На этом основан **принцип сочетания:** *Наиболее эффективны сочетания таких мероприятий, которые воздействуют на основные процессы в печи в противоположных направлениях.*

Рассмотренные два принципа охватывают доменную плавку как простую совокупность явлений, но не учитывают ее единства как большой системы, в которой связи между элементами не менее весомы, чем сами элементы, а система включает свойства, не присущие отдельным ее элементам. По мере совершенствования такой системы ряд комплексных параметров приближаются к предельному состоянию независимо от влияющих факторов. Формально это выражается в уменьшении энтропии системы.

Системный подход позволяет сформулировать **принцип предельных состояний:** *По мере совершенствования технологии доменной плавки и приближения к некоторому предельному режиму эффективность всей совокупности мероприятий по ее дальнейшему улучшению снижается.*

**Заключение.** На основе обобщения закономерностей протекания процессов доменной плавки и установленных общих принципов её функционирования дается нормативная оценка влияния технологических параметров на расход кокса и производительность доменной печи. Указанная нормативная оценка является методической основой для выполнения оперативного анализа технологии.

Разработанный методический инструмент «Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность доменной печи» является развитием ранее разработанного и используемого в металлургии России, Украины и Казахстана руководящего отраслевого документа «Доменные печи. Нормативы расхода кокса», Москва-Днепропетровск, 1987 г.». Новый документ существенно дополнен и уточнен на основе результатов выполненных в истекшие годы аналитиче-

ских и экспериментальных исследований, а также обобщения опыта работы доменных печей.

1. *Товаровский И.Г.* Изучение влияния технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи в широком диапазоне условий с установлением научно обоснованных нормативов // Тезисы докладов на Всесоюзном научно-техническом совещании «Повышение технического уровня и совершенствование технологии доменного производства», Липецк, май 1982, «Черметинформация», 1982. – С.14-17.
2. *Товаровский И.Г., Хомич В.Н.* Принципы оценки влияния технологических факторов на показатели доменной плавки // Сталь. – 1979. – №12. – С.895-898.
3. *Товаровский И.Г.* Влияние технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи // «Экономия кокса в доменных печах». Сб. трудов (отраслевой). – М., «Металлургия», 1986. – С.75-83.
4. *Доменные печи.* Нормативы расхода кокса. Руководящий документ. Министерство черной металлургии СССР. Техническое управление. Институт черной металлургии. – Москва – Днепропетровск, 1987 г. – С.1-14.
5. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. 2-е издание. – Днепропетровск: «Пороги», 2009. – 764 с.
6. *Товаровский И.Г.* Процессы доменной плавки. Монография. Том 1. Анализ состояния. –595 с. Том 2. Проблемы и перспективы. – 406 с. // Издательский дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. Язык русский.
7. *Товаровский И.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е.* Аналитическое исследование процессов доменной плавки. Монография. – Днепропетровск: «Экономика», 2011. – 206 с.
8. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
9. *Опытная плавка с уменьшенным выходом шлака / Н.Н.Бабарыкин, А.Л.Галатонов, И.И.Сагайдак и др.* // Сталь. – 1964. – № 12. – С.1069–1079.
10. *Освоение технологии производства и плавка агломерата из концентрата глубокого обогащения / З.И.Некрасов, В.Л.Покрышкин, А.Г.Ульянов и др.* // Сталь. – 1970. – № 3. – С.202–207.
11. *Применение металлизированного сырья в доменных печах / Р.М.Жак, А.Н.Пыриков, Г.А.Зинягин и др.* // Обзорная информация Черная металлургия. Сер. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна. – М.: Черметинформация. – 1983. – Вып.4. – 31 с.
12. *Мойкин В.И., Боковинов Б.А., Бабушкин Н.М.* Теплотехнический анализ работы доменной печи на металлизированной шихте методом математического моделирования // Сталь. – 1978. – № 11. – С.982–986.
13. *Работа доменной печи с использованием освобожденного от мелочи высокоосновного агломерата / И.А.Прокофьев, И.Г.Товаровский, В.И.Бондаренко и др.* // Сталь. – 1979. – № 5. – С.332-333.
14. *Журавлев Г.В., Попов Н.Н., Коростик П.О.* Влияние качества кокса при выплавке чугуна // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1980. – № 4. – С.28–29.
15. *Исследование влияния реакционной способности, прочности и истираемости кокса на показатели работы доменных печей / В.С.Листопадов, В.П.Лялюк,*

- В.А.Шермет и др. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия» –2010. – №8. – С.14-21.
16. *Тараканов А. К., Лялюк В. П., Кассим Д. А.* Обоснование современных подходов к оценке качества доменного кокса // *Сталь*. – 2011. – № 7. – С.20-22.
  17. *Влияние* реакционной способности и «горячей» прочности кокса на технико-экономические показатели доменной плавки в условиях ОАО «МК «Азов-сталь» / А.А.Томаш, В.П.Тарасов, Р.В.Ковальчик и др. // *Вісник Приазовського державного технічного університету*. – 2007. – №17. – С.9–13.
  18. *Ухмылова Г.С.* Оптимизация качества металлургического кокса // «Черметинформация», приложение к «Новостям черной металлургии за рубежом». – 2002. – № 3. – 11 с.
  19. *Влияние* технологических параметров на показатели доменной плавки / Б.Н.Старшинов, Н.Т.Романенко, А.В.Гаврашенко и др. // *Сталь*. –1968. – №8. – С.677-679.
  20. *Шумахер Х.* Опыт работы доменной печи на высокотемпературном дутье // *Черные металлы*. – 1966. – № 6. – С.3–11.
  21. *Товаровский И.Г., Бояровская Г.П.* Эффективность нагрева доменного дутья // *Сталь*. – 1977. – № 12. – С.1068–1074.
  22. *Шокул А.А., Лозовой В.П., Шаркевич Л.П.* Работа доменной печи с нагревом дутья до 1200–1380<sup>0</sup>С // *Сталь*. – 1983. – № 3. – С.10–13.
  23. *Опытная* плавка в доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> при обогащении дутья кислородом до 30 % / З.И.Некрасов, П.Г.Нетребко, Ф.Н.Москалина и др. // *Сталь*. – 1971. – № 10. – С.887–894.
  24. *Доменная* плавка на комбинированном дутье, содержащем 30–32 % кислорода / З.И.Некрасов, М.Т.Бузоверя, Ф.Н.Москалина, В.А.Шатлов // *Сталь*. – 1978. – № 4. – С.306–310.
  25. *Опытные* плавки в доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> на дутье с концентрацией кислорода до 35% / З.И.Некрасов, С.В.Колпаков, А.Ф.Андреев и др. // *Сталь*. – 1973. – № 2. – С.97–104.
  26. *Первый* опыт работы доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> НЛМЗ с обогащением дутья кислородом до 40% / З.И.Некрасов, Н.С.Антипов, Н.М.Можаренко и др. // *Сталь*. – 1981. – № 7. – С. 7–9.
  27. *Русаков П.Г., Шур А.Б.* Некоторые вопросы применения кислорода в доменной плавке // *Сталь*. – 1968. – № 8. – С.679–683.
  28. *Работа* доменной печи Череповецкого завода на комбинированном дутье высоких параметров / Л.А.Бялый, Б.Л.Жураковский, А.Г.Михалевич и др. // *Сталь*. – 1978. – № 9. – С.782–787.
  29. *Работа* доменной печи с низкой степенью компенсации кислорода природным газом/ Л.А.Бялый, В.А.Улахович, Б.Л.Жураковский и др. // *Сталь*. – 1981. – № 11. – С.31–35.
  30. *Доменная* плавка с вдуванием коксового газа / В.Ф.Пашинский, И.Г.Товаровский, П.Е.Коваленко, Н.Г.Бойков. – Киев: Техника, 1991. – 104 с.
  31. *Эффективность* частичной замены кокса пылеугольным топливом в условиях завода «Запорожсталь» / А.Г.Ульянов, Ю.А.Приходько, Ф.Н.Москалина и др. // *Металлург*. – 1983. – № 11. – С.13–14.
  32. *Ярошевский С.Л.* Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Металлургия. – 1988. – 176 с.

33. Доменная плавка на дутье, обогащенном кислородом до 30% с расходом мазута до 100 кг/т чугуна / В.Н.Вакулин, Н.Е.Дунаев, В.В.Емушинцев и др. // Сталь. – 1976. – № 7. – С.585–591.
34. *Каган И.С., Сабин-Гуз Л.А.* Применение корреляционного метода для выявления эффективности повышенного давления газа на колошнике доменной печи // *Металлургия и коксохимия (межвузовский сборник)*. – Киев: Техніка, 1966. – № 1. – С.115–120.
35. *Организационные проблемы* повышения эффективности доменного производства / А.И.Стрелец, Л.П.Макаров, Л.Л.Гелюх и др. – М.: *Металлургия*, 1986. – 216 с.
36. *Повышение эффективности* выплавки чугуна за счет сокращения текущих простоев / А.И.Стрелец, А.А.Бачинин, А.М.Осипенко и др. // *Металлург*. – 1980. – № 11. – С.13–14.
37. *Об оценке* влияния текущих простоев на производительность доменных печей / Ю.П.Волков, И.А.Розентрегер, Н.Т.Романенко и др. // *Сталь*. – 1983. – № 1. – С.8–10.
38. *Остроухов М.Я., Шнарбер Л.Я.* Справочник мастера-доменщика. – М.: *Металлургия*, 1977. – 304 с.
39. *Антрацит* и термоантрацит в шихте доменной плавки. / В.П.Лялюк, И.Г.Товаровский, Д.А.Демчук, и др. – Днепропетровск: Пороги, 2008. – 245 с.

*Статья рекомендована к печати  
канд.техн.наук Н.М.Можаренко*

### ***І.Г.Товаровський***

#### **Нормативна оцінка впливу параметрів доменної плавки на витрату коксу і продуктивність**

Розроблено методичний інструмент з оцінки впливу параметрів доменної плавки на витрату коксу і продуктивність. Новий документ є розвитком раніше розробленого і використовуваного в металургії керівного галузевого документа «Доменні печі. Нормативи витрати коксу». На основі результатів виконаних аналітичних та експериментальних досліджень, а також узагальнення досвіду роботи приведена нормативна оцінка впливу технологічних параметрів на витрату коксу і продуктивність доменної печі.

**Ключові слова:** доменна плавка, витрати коксу, нормативи, досвід роботи, дослідження

### ***I.G.Tovarovsky***

#### ***Normative estimation of influence parameters for blast furnace coke consumption and productivity***

Methodological tool was designed to assess the influence of the blast furnace parameters on coke consumption and performance. The document is the development of previously developed and used in metallurgy industry guideline document "Blast furnaces. Coke consumption standards." New document substantially amended and updated on the basis of the results of completed analytical and experimental studies, and generalization of experience of blast furnaces work.

**Keywords:** blast furnace, coke consumption, standards, regulations, work experience, research