

И.Г.Товаровский

АНАЛИЗ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ГАЗОВ ПО РАДИУСУ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

На основе моделирования процессов доменной плавки установлено, что параметр $1/T^2_{отг}$, определенный по измеренной температуре газа для каждой радиальной кольцевой зоны колошника, адекватно отражает изменения рудной нагрузки по радиусу доменной печи и может быть использован при моделировании для замены натуральных величин рудной нагрузки по радиусу, определенных расчетом по заданным параметрам загрузки шихты.

доменная печь, рудная нагрузка, температура колошника

Введение. Системный анализ процессов доменной плавки, выполненный с помощью разработанной в Институте черной металлургии НАН Украины математической модели и включающий многовариантные расчеты показателей процессов при варьировании в широком диапазоне реальных значений параметров шихты, дутья и распределения материалов на колошнике, показал существенные количественные отличия результатов для разных условий и сочетаний параметров [1,2]. Выявлены также отличия от результатов балансовых расчетов. Последние обусловлены более адекватным отражением, моделью закономерностей процессов доменной плавки, представленных в виде комплекса полиморфных температурно–концентрационных, фазовых и газодинамических полей в объеме доменной печи (ДП), дискретизированных на 120 локальных объемов (12 вертикальных температурных зон – ВТЗ по высоте и 10 радиальных кольцевых зон – РКЗ), которые связаны между собой единой системой материально–теплового баланса с выявлением лимитирующего локального объема.

Анализ процессов на такой основе позволил избежать, по–меньшей мере, системных ошибок, присущих известным подходам, выявить и уточнить некоторые закономерности хода процессов, в том числе закономерности трансформации температурно–концентрационных, фазовых и газодинамических полей в объеме ДП, а также поперечных перетоков газа по высоте столба шихты, которые позволяют объяснить ряд сложных явлений и могут рассматриваться как инструменты саморегулирования в большой системе «Доменная плавка» [1,2].

Среди задач, решаемых в ходе системного анализа, ключевое значение имеет количественная оценка распределения материалов и газов по радиусу ДП. Она базируется на возможности расчета по модели параметров газового потока в 10-ти РКЗ по радиусу ДП при заданном распределении в этих РКЗ относительных рудных нагрузок (РН, относительно средней) или долей каждого компонента шихты. В прогнозных вариантах расчета распределение РН на колошнике задается как желаемое с последую-

щим уточнением необходимых для его реализации параметров загрузки. При формировании базовых вариантов требуется рассчитать фактическое распределение РН при заданных параметрах загрузки и физико-механических свойствах шихтовых материалов. Методика такого расчета и математическая модель для ДП, оборудованных бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ), разработаны и используются в Институте черной металлургии [3]. Достоверность и точность результатов расчета распределения материалов зависит от характера измерений параметров загрузки с учетом принятых допущений и обычно оценивается степенью соответствия полученному фактически распределению содержания CO_2 и (или) температуры газа по радиусу.

Результаты проведенного анализа. Таким образом, для доменных печей, оборудованных БЗУ, задачу можно считать в основном решенной. Дополнительные решения необходимы лишь для периодов, в которых не достаёт исходных данных и нет возможности их восстановить.

Что касается ДП с конусными загрузочными устройствами (КЗУ), то для них возможности адекватной оценки распределения материалов по радиусу ограничены неизбежностью грубых допущений в расчетах, а также конструктивно – инструментальными затруднениями при реализации. Это означает, что для оценки распределения материалов на большинстве доменных печей необходимы новые решения, позволяющие установить распределение РН по радиусу печи при недостатке исходной информации. Такие решения возможны на основе «восстановления» параметров распределения материалов из информации о распределении газового потока.

Оценку указанных возможностей выполнили с помощью упомянутой выше математической модели ДП. Для этого рассчитали базовый вариант плавки, в качестве которого приняли показатели ДП-9 ПАО «Арселор-Миттал Кривой Рог» в октябре 2006 года при фактическом распределении материалов ($RH_{\text{База}}$), а также ряд прогнозных вариантов плавки с различным заданным значением относительной РН (относительно средней) при других возможных распределениях (параболическом – Пар1, Пар2, Пар3 и Равномерном в РК3-2-10):

РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$RH_{\text{База}}$	0,414	1,541	1,475	1,125	1,008	0,995	1,049	0,995	0,961	0,926
Пар-1	0,358	0,866	1,082	1,212	1,345	1,385	1,385	1,298	1,039	0,692
Пар-2	0,386	0,866	1,04	1,156	1,213	1,213	1,196	1,17	1,126	1,04
Пар-3	0,527	0,83	1,057	1,26	1,341	1,341	1,293	1,165	0,958	0,67
Равн	0,409	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,098

Результаты расчетов приведены в табл.1 и 2, а также на рис.1 и 2.

Таблица 1. Показатели работы доменной печи полезным объемом 5000 м³ при различном распределении рудной нагрузки по радиусу

Показатели работы доменной печи	База	Пар.1	Пар.2	Пар.3	Равн.
Среднесуточное производство, т	9604	9330	9474	9483	9803
Удельная производит-ть, т/(м³·сут)	1,91	1,85	1,88	1,88	1,95
Расход кускового топлива, кг/т	483	494	485	484	469
Дутье*: расход, м ³ /мин.	6674	6758	6732	6735	6665
Расход технич. кислорода, м ³ /т	141	147	145	144	138
Колошниковый газ: температура, °С	81	163	135	140	65
содержание, %: СО	29,1	28,9	28,5	28,4	28,0
СО ₂	19,8	19,8	20,1	20,2	20,7
Н ₂	7,7	7,5	7,6	7,5	7,7
Агл+Окат+Добав., кг/т	1714				
Известняк	35	37	36	36	34
Железо в шихте, %	55,19	55,14	55,16	55,16	55,21
Рудная нагрузка, т/т	3,676	3,599	3,660	3,668	3,787
Количество шлака, кг/т	416	418	417	417	416
В шлаке, %: кремнезем	37,0	37,2	37,1	37,1	37,0
глинозем	8,7	8,8	8,8	8,8	8,7
известь	45,0	45,2	45,1	45,1	44,9
магнезия	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Объем влажного газа, м ³ /т	1715	1765	1737	1735	1676
Теорет. температура горения, °С	2219	2237	2228	2228	2209
Кол-во фурменного газа, м ³ /т	1502	1558	1532	1531	1473
Кол-во сухого колошн. газа, м ³ /т	1607	1654	1625	1623	1564
Прямое восстановление оксида Fe, %	35,92	33,38	33,10	32,76	33,40
Степень использования СО+Н ₂ , %	40,47	40,65	41,33	41,53	42,42
Общий приход теплоты, кДж/кг	4425	4626	4533	4530	4323
Потребность теплоты, кДж/кг	3899	3850	3838	3826	3834
Потери теплоты, кДж/кг	302	306	311	306	313
Доля полезной теплоты, %	88,11	83,21	84,67	84,45	88,70
Отношение водяных чисел	0,856	0,843	0,851	0,850	0,867
Теплотворность колошн. газа, кДж/м ³	4513	4455	4418	4402	4372
Скорость газов, м/сек:					
на колошнике при норм. условиях	2,081	2,081	2,079	2,078	2,076
при фактических условиях	1,129	1,389	1,30	1,316	1,074
В шахте при норм. условиях	1,107	1,106	1,105	1,105	1,104
при фактических условиях	2,090	2,099	2,092	2,092	2,079
Газопроницаемость: общая	19,2	19,8	19,6	19,6	18,9
верха	40,4	42,5	41,8	41,9	39,8
низа	14,1	14,2	14,1	14,1	14,0
Инт-сть по газу нижней зоны, м ³ /(м ³ ·мин)	2,273	2,272	2,270	2,269	2,267
кг кокса/(м ³ ·сут)	902	896	894	893	893
То же по рудной сыпи	3217	3124	3173	3176	3284
Мощность струи фурмы, кВт	82,8	84,7	84,3	84,4	83,1
*Т _д =1090°С, ПГ=87 м ³ /т, О ₂ =30,5%. Чугун: [Si]=0,84; [Mn]=0,34; [S]=0,019					

Таблица 2. Сопоставление величин РН с имитирующими её параметрами газового потока $1/T_{\text{отн}}$, $1/T_{\text{отн}}^2$ и $\text{CO}_{2\text{отн}}$ в РКЗ1-10 для разных распределений РН

РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РН-база	0,414	1,541	1,475	1,125	1,008	0,995	1,049	0,995	0,961	0,926
CO_{2отн}	0,775	1,01	1,025	1,025	1,063	1,048	1,061	1,041	1,027	0,844
1/T_{отн}	0,644	1,206	1,206	1,206	1,056	0,994	1,009	0,999	0,984	0,856
РН-пар-1	0,358	0,866	1,082	1,212	1,345	1,385	1,385	1,298	1,039	0,692
CO_{2отн}	0,689	1,008	1,06	1,096	1,082	1,082	1,082	1,086	1,051	0,775
1/T_{отн}	0,617	0,929	1,065	1,101	1,196	1,196	1,196	1,196	1,023	0,716
РН-пар-2	0,386	0,866	1,040	1,156	1,213	1,213	1,196	1,17	1,126	1,04
CO_{2отн}	0,709	0,997	1,041	1,068	1,063	1,063	1,063	1,063	1,055	0,880
1/T_{отн}	0,641	0,937	1,045	1,103	1,160	1,160	1,150	1,119	1,092	0,904
РН-пар-3	0,527	0,830	1,057	1,260	1,341	1,341	1,293	1,165	0,958	0,67
CO_{2отн}	0,841	0,994	1,055	1,062	1,062	1,062	1,065	1,068	1,027	0,766
1/T_{отн}	0,726	0,919	1,057	1,155	1,155	1,155	1,155	1,127	0,996	0,715
РН-равн	0,408	1,101	1,101	1,101	1,101	1,101	1,101	1,101	1,101	1,096
CO_{2отн}	0,771	1,032	1,032	1,032	1,032	1,033	1,033	1,033	1,032	0,969
1/T_{отн}	0,661	1,066	1,066	1,066	1,066	1,066	1,066	1,066	1,066	0,912
То же после преобразования										
РН-база	0,414	1,541	1,475	1,125	1,008	0,995	1,049	0,995	0,961	0,926
1/T_{отн}²	0,404	1,42	1,42	1,42	1,084	0,965	0,994	0,975	0,946	0,895
CO_{2отн}	0,456	1,086	1,102	1,102	1,143	1,126	1,14	1,119	1,104	0,907
РН-пар-1	0,358	0,866	1,082	1,212	1,345	1,385	1,385	1,298	1,039	0,692
1/T_{отн}²	0,37	0,842	1,103	1,181	1,395	1,395	1,395	1,395	1,02	0,625
CO_{2отн}	0,314	1,103	1,161	1,2	1,185	1,185	1,185	1,189	1,151	0,849
РН-пар-2	0,386	0,866	1,04	1,156	1,213	1,213	1,196	1,17	1,126	1,04
1/T_{отн}²	0,389	0,83	1,021	1,144	1,267	1,267	1,267	1,182	1,116	0,965
CO_{2отн}	0,347	1,082	1,130	1,159	1,154	1,154	1,154	1,154	1,145	0,955
РН-пар-3	0,527	0,83	1,057	1,26	1,341	1,341	1,293	1,165	0,958	0,67
1/T_{отн}²	0,518	0,831	1,091	1,298	1,298	1,298	1,298	1,239	0,973	0,629
CO_{2отн}	0,584	1,042	1,106	1,113	1,113	1,113	1,116	1,119	1,077	0,803
РН-равн	0,409	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103	1,098
1/T_{отн}²	0,427	1,108	1,108	1,108	1,108	1,108	1,108	1,108	1,108	1,019
CO_{2отн}	0,447	1,099	1,10	1,10	1,10	1,10	1,101	1,101	1,10	1,033

По сравнению с базовым распределением РН два параболических (Пар–2 и Пар–3) дают незначительное увеличение расхода кокса при некотором увеличении температуры колошникового газа и сокращении прямого восстановления. Третье параболическое распределение РН (Пар–1) приводит к существенному увеличению расхода кокса при значительном повышении температуры колошникового газа за счет чрезмерного

развития периферийного потока газов, вследствие пониженной РН у периферии. Наиболее эффективно равномерное в РКЗ-2-10 распределение РН.

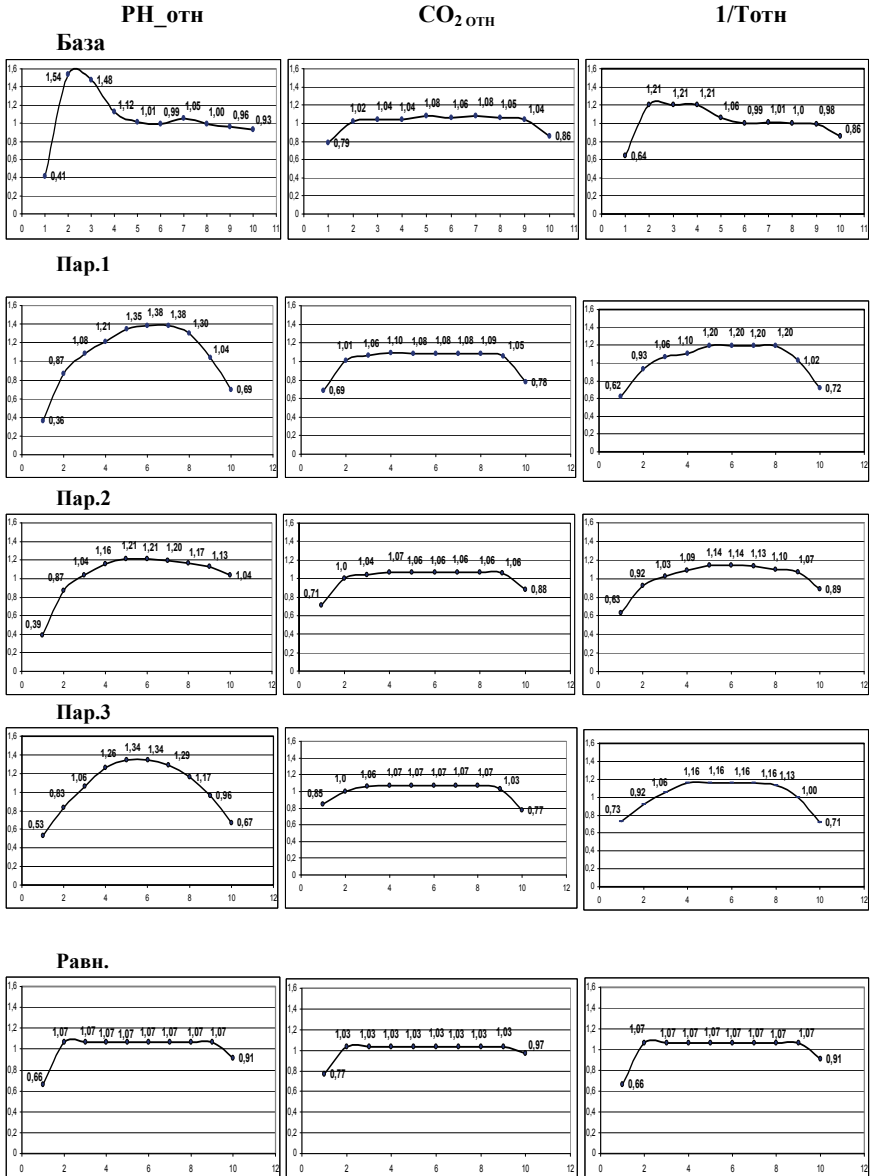


Рис.1. Распределение заданных величин относительной РН и имитирующих их параметров газового потока $1/T_{отн}$ и $CO_{2отн}$ (по вертикали) между РКЗ-1-10 (по горизонтали) для разных форм распределения РН (База Пар.1,2,3 – Равн).

С целью решения задачи идентификации показателей газового потока в верхней части столба шихты и распределения РН на колошнике сопоставили расчетное распределение содержания CO_2 в газе и его температуры с заданным распределением РН (табл.2). Для удобства сопоставления приняли обратную величину температуры и использовали относительные величины: $1/T_{\text{отн}}$ и $\text{CO}_{2\text{отн}}$. Данные первой половины табл.2 позволяют заключить, что параметры газа $1/T_{\text{отн}}$ и $\text{CO}_{2\text{отн}}$ отражают изменения РН только качественно. Наибольшие количественные отклонения имеют место у оси и периферии, причем в большей мере для $\text{CO}_{2\text{отн}}$. Наглядная графическая форма данных (рис.1) позволяет наблюдать не только величины отклонений, но также их локализацию, значимость и связи с другими параметрами.

Кроме указанных существенных отклонений в осевой и периферийной зонах, на рис.1 отчетливо наблюдается горизонтальное «сглаживание» значений РН в области максимума, установленных по критериям $1/T_{\text{отн}}$ и $\text{CO}_{2\text{отн}}$, причем для $\text{CO}_{2\text{отн}}$ оно выражено широко и отчетливо при всех формах распределения РН, а для $1/T_{\text{отн}}$ – локально в области максимума для тех форм распределения РН, в которых он отчетливо выражен. Указанная особенность отражения РН объясняется тем, что в некоторых РКЗ с максимальной РН и смежных с ними РКЗ процессы тепло– и массообмена достигают предельного состояния, характеризующегося близостью реакций к равновесию и (или) вырождением верхней ступени теплообмена. В этом состоянии изменение величины РН не приводит к заметному изменению состава и температуры газа, а в условиях, близких к этому состоянию, требуется усилить малозаметное влияние путем преобразования переменных. Выполненное применительно к анализируемым материалам многовариантное преобразование показало, что наилучшая «наблюдаемость» изменений РН имеет место при имитации её параметром $1/T_{\text{отн}}^2$ для всех РКЗ. Что касается параметра $\text{CO}_{2\text{отн}}$, то «наблюдаемость» РН улучшается только в осевой РКЗ–1 в случае преобразования $(\text{CO}_{2\text{отн}})^{3,3}$. Для РКЗ с повышенной РН преобразования $\text{CO}_{2\text{отн}}$ не дают желаемого эффекта.

Выполненные преобразования учтены при формировании нижней половины табл.2 и результатов, приведенных на рис.2.

Из приведенных данных следует:

1. Распределение РН по радиусу адекватно отражается параметром $1/T_{\text{отн}}^2$ по измеренной температуре газа (погрешность до 5%, отн.).

2. Содержание CO_2 в газе в виде параметра $(\text{CO}_{2\text{отн}})^{3,3}$ отражает изменения РН только для осевой и приосевой РКЗ. При относительной РН > 1,1 указанный параметр дает «сглаженную» РН. Возможности повышения «наблюдаемости» РН по измеренному CO_2 требуют дополнительного изучения.

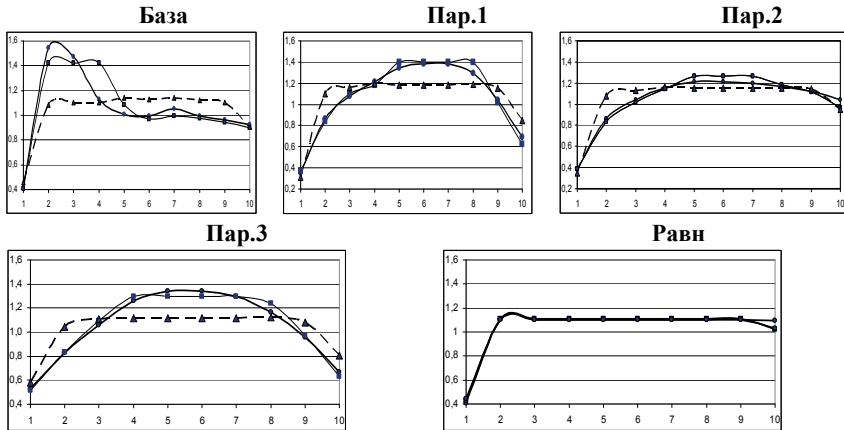


Рис.2. Распределение (по вертикали) рудных нагрузок на колошнике в форме расчетных РН (сплошная линия с кругами), величин $1/T_{\text{отн}}^2$ по измеренной температуре газа (сплошная тонкая линия с квадратами) и $\text{CO}_{2\text{отн}}$ (пунктир с треугольниками) в РКЗ–1–10 (по горизонтали) для вариантов распределения РН: фактического (База), параболических (Пар.1, Пар.2, Пар.3) и равномерного (Равн.) (значения в нижней части табл.2)

Заключение. На основе моделирования процессов доменной плавки установлено, что параметр $1/T_{\text{отн}}^2$, определенный по измеренной температуре газа для каждой РКЗ, адекватно отражает изменения РН по радиусу доменной печи и может быть использован для замещения натуральных величин РН по радиусу, определенных расчетом по заданным параметрам загрузки шихты. Это позволит углубить анализ распределения материалов и газов по радиусу доменной печи, оборудованных БЗУ и соответствующими информационными системами, а также реализовать возможность выполнения этого анализа на других печах, в том числе оборудованных КЗУ.

1. *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.
2. *Товаровский И.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е.* Аналитическое исследование процессов доменной плавки. Монография. – Днепропетровск: «Экономика», 2011. – 206 с.
3. *Большаков В.И.* Модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, оборудованной БЗУ/ В.И.Большаков, Ю.С.Семенов, В.В.Лебедь, Е.И.Шумельчик, В.И.Вишняков// Сб. научн. трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2011.- Вып. 23.- С. 52-61.

І. Г.Товаровський

Аналіз критеріїв оцінки розподілу шихтових матеріалів і газів за радіусом доменної печі.

На основі моделювання процесів доменної плавки встановлено, що параметр $1/T_{\text{отн}}^2$, визначений за вимірною температурою газу для кожної радіальної кільцевої зони колошника, адекватно відображає зміну рудного навантаження за радіусом доменної печі і його може бути використано при моделюванні для заміни натуральних величин рудного навантаження за радіусом, визначених розрахунком за заданими параметрами завантаження шихти.