

И.Г.Товаровский, В.И.Большаков, Ф.М.Шутылев

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИХТЫ НА ТЕПЛО- МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПОКАЗАТЕЛИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Выполнено расчетно–аналитическое исследование процессов теплообмена, восстановления и плавления шихты по высоте и поперечному сечению доменной печи в сочетании с экспериментальным изучением параметров загрузки и распределения материалов на колошнике, что позволило осуществить научно обоснованный выбор рационального сочетания параметров распределения шихты и газов в доменной печи для достижения высоких технико–экономических показателей плавки.

Современное состояние вопроса. Использование бесконусных загрузочных устройств, а также современных систем контроля и управления позволяет давать количественную оценку характеру распределения материалов на колошнике. Однако связь характера распределения материалов с ходом процессов в столбе шихты и показателями плавки до сих пор оценивается специалистами качественно на эмпирическом уровне. Разработанные в ИЧМ НАН Украины инженерная методика расчета программ загрузки [1] и математическая модель распределения шихтовых материалов по радиусу колошника, включающая алгоритм «Траектория», реализованный ранее в составе АСУ загрузки доменной печи [2], обеспечили с учетом новых факторов возможность перехода к расчетным методам формирования программ загрузки, как основного инструмента распределения шихтовых материалов по радиусу колошника доменной печи.

Аналитическое рассмотрение вопроса стало возможным на основе методики численного анализа процессов доменной плавки по высоте и поперечному сечению доменной печи, позволяющей количественно оценивать различное распределение шихтовых материалов на колошнике при разных параметрах плавки [3,4]. Рассматривается протекание процессов в 10 радиальных кольцевых зонах (РКЗ–1 – центральная, РКЗ–10 – периферийная) по высоте 12 вертикальных температурных зон (ВТЗ). Многозонный расчет параметров состояния процессов в рабочем объеме печи совмещен с прогнозным расчетом технико–экономических показателей плавки на основе общих материального и теплового балансов.

Методика исследования. Сочетание аналитического и экспериментального исследований формирует новый экспериментально–аналитический подход как более эффективный инструмент выбора рациональных параметров плавки. Его использование иллюстрируется ниже на примере доменной печи полезным объемом 5500 м³.

На этой печи в порядке эксперимента изменяли распределение рудных нагрузок (РН) по радиусу колошника путем установления различ-

ных параметров загрузки и определяли полученные при этом фактические показатели плавки. По разработанной методике численного анализа процессов доменной плавки по высоте и поперечному сечению доменной печи, совмещенной с прогнозным расчетом технико-экономических показателей плавки, определяли состояние процессов тепло-массообмена и газодинамики в рабочем объеме для фактических и прогнозируемых режимов. На основе анализа полученных результатов устанавливали приоритетные режимы.

Анализ выполнен для трех распределений рудных нагрузок по радиусу колошника: РРН-1, РРН-2 и РРН-3. При этом РРН-2 (12 суток работы печи) и РРН-3 (21 сутки работы печи) – фактическое распределение в указанные периоды, а РРН-1 – специально разработанная для исследований программа загрузки для условий РРН-3 с намеренным ухудшением показателей распределения и на печи не применявшаяся. Расчеты состояния процессов тепло-массообмена и газодинамики в рабочем объеме при фактических и прогнозируемых режимах выполнены для каждого из трех вариантов распределения рудных нагрузок. Результаты приведены на рис.1 и в табл.1 и табл.2.

При расчете технических показателей плавки в прогнозируемых режимах в одном случае в качестве базы приняты фактические показатели плавки с РПК-3 (первые три колонки табл.2), в другом – фактические показатели плавки с РПК-2 (вторые три колонки табл.2). Варианты в таблицах и на рисунках расположены в порядке уменьшения расхода кокса и увеличения степени использования оксида углерода.

Результаты исследования. Анализ результатов моделирования показал следующее (рис.1): распределения РРН-1, РРН-2, РРН-3 характерны увеличением рудных нагрузок от РКЗ-1 к РКЗ-3 с последующим её уменьшением в РКЗ-4 и дальнейшим плавным подъемом от РКЗ-4 к РКЗ-10. При этом скорость увеличения рудной нагрузки от РКЗ-1 к РКЗ-3 для РРН-1 наименьшая, а для РРН-3 наибольшая, величина последующего уменьшения рудной нагрузки в РКЗ-4 для РРН-1 наибольшая, а для РРН-3 наименьшая. Последовательность изменения распределений РРН-1, РРН-2, РРН-3 характерна увеличением рудных нагрузок в прицентральных зонах (РКЗ-2,3,4) при повышенной рудной нагрузке у периферии. Указанные тенденции отражаются в более рациональном распределении температур в объеме печи (рис.1,2). В результате расход кокса в последовательности РРН-1÷3 снижается, а степень использования тепловой и восстановительной энергии газов увеличивается (табл.2).

Сравнение фактических показателей двух базовых периодов определяет выбор в качестве лучшего распределения – РРН-3, что подтверждается достаточной сходимостью расчетных показателей распределения с фактическими и лучшими показателями работы печи в указанные периоды (см. табл.1 и табл.2). Так, расчетная средняя рудная нагрузка для РРН-2 отличается от фактических на 0,25%, а для РРН-3 находится в диапазоне фак-

тических. Для РРН–1 отличие заданных и расчетных средних рудных нагрузок в том, что программа РРН–1 искусственно рассчитана для периода РРН–3 без учета технологических условий работы печи. Расчеты показали, что такая программа загрузки позволяет обеспечить среднюю рудную нагрузку на уровне 3,93–3,95, а не 4,05, как это было принято в задании.

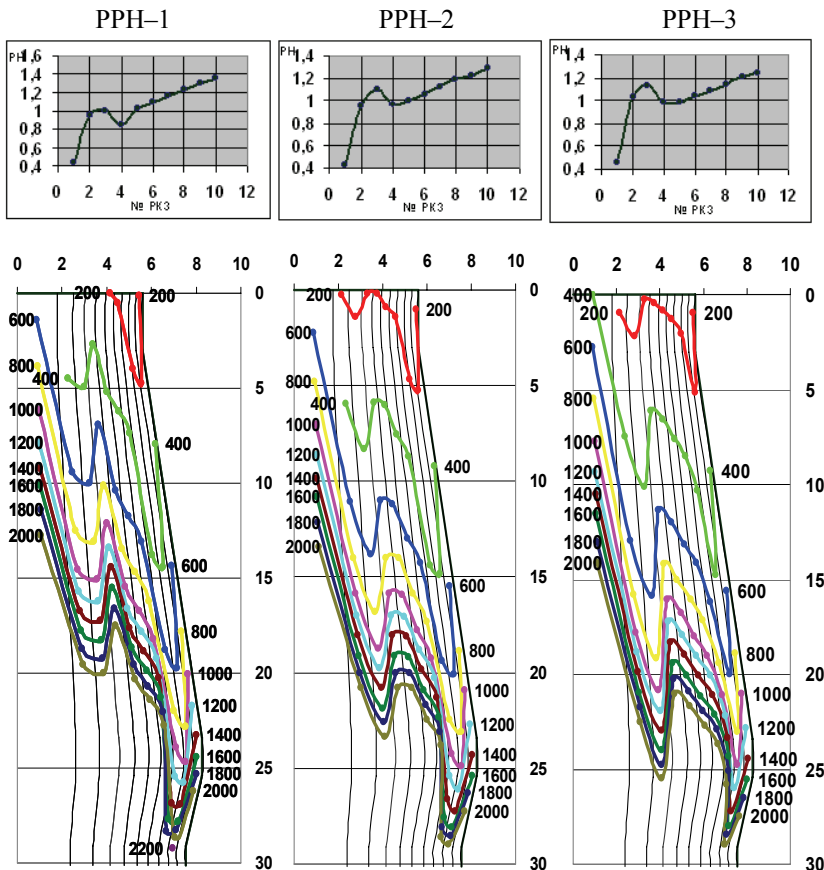


Рис.1. Относительная рудная нагрузка (РН) в 10-ти радиальных кольцевых зонах (верхний рис.) и соответствующие изотермы газа в объеме доменной печи (нижний рис., где: по горизонтали – расстояние от центра, по вертикали – расстояние от верха, м)

Таблица 1. Распределение шихтовых материалов по угловым позициям лотка и по радиусу колошника в равновеликих зонах, соответствующих угловым позициям лотка

Период	Масса порции, т	Распределение		Распределение шихтовых материалов (Q, V) и рудной нагрузки (R _d) в кольцевых зонах по радиусу колошника										R _{ср.} (R _{ф.факт.})	Ур. зас. м			
		с лотка	на колошнике	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1					
РРН-1	Q _{шк} =120 Q _к =29,6	с лотка	Q _{шк,т}	0	22	24	23	19	18	14	0	0	0	0	4,05	1,0		
			Q _{к,т}	0	0	5,8	5,8	5,8	6,4	0	0	0	0	0				
		на колошнике	R _{d, т/т}	0	7,93	3,97	3,27	3,10	2,19	0	0	0	0	0	3,96 (3,96-4,0)	1,0		
			R _{d, т/т}	5,49	4,98	4,68	4,42	4,13	3,43	4,03	3,88	1,74	0	0				
			Q _{шк,т}	13,8	13,5	13,24	12,91	12,5	12,08	11,02	12,02	11,74	7,16	0			0	
			Q _{к,т}	2,52	2,66	2,76	2,83	2,92	3,21	2,99	3,03	4,12	0	0			0	
РРН-2	Q _{шк} =30,3	с лотка	V _{шк, м³}	6,74	6,57	6,44	6,28	6,08	5,88	5,36	5,58	5,72	3,48	3,96 (3,96-4,0)	1,0			
			V _{к, м³}	5,04	5,32	5,51	5,65	5,84	6,41	5,97	6,06	8,23	0			0		
		на колошнике	V _{общ, м³}	11,8	11,7	11,76	11,79	11,7	11,73	11,78	11,82	11,78	11,71	0	0	4,05 (4,0-4,09)	1,0	
			Q _{шк,т}	0	16	21	22	22	20	19	0	0	0	0	0			
			Q _{к,т}	0	0	6,0	6,0	6,1	6,1	6,1	6,1	0	0	0	0			0
			R _{d, т/т}	0	6,17	3,67	3,61	3,28	3,11	0	0	0	0	0	0			
РРН-3	Q _{шк} =120 Q _к =29,6	с лотка	R _{d, т/т}	5,07	4,84	4,71	4,43	4,19	3,95	3,81	4,34	3,79	1,70	3,96 (3,96-4,0)	1,0			
			Q _{шк,т}	13,5	13,2	13,04	12,68	12,4	12,01	11,76	12,54	11,72	7,20			0	0	
		на колошнике	Q _{к,т}	2,66	2,73	2,77	2,86	2,95	3,04	3,09	2,89	3,09	4,23	0	0	4,05 (4,0-4,09)	1,0	
			V _{шк, м³}	6,57	6,43	6,35	6,17	6,02	5,85	5,72	6,10	5,70	3,50	0	0			
			V _{к, м³}	5,33	5,45	5,54	5,72	5,89	6,08	6,18	5,78	6,18	8,45	0	0			
			V _{общ, м³}	11,9	11,9	11,89	11,89	11,9	11,93	11,90	11,88	11,88	11,95	0	0			
РРН-3	Q _{шк} =120 Q _к =29,6	с лотка	Q _{шк,т}	0	16	21	21	22	20	20	0	0	0	4,05 (4,0-4,09)	1,0			
			Q _{к,т}	0	0	6,4	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	0	0			0	0	
		на колошнике	R _{d, т/т}	0	5,78	3,62	3,79	3,45	3,45	0	0	0	0	0	4,05 (4,0-4,09)	1,0		
			R _{d, т/т}	5,04	4,87	4,61	4,39	4,20	3,96	3,96	4,56	4,15	1,85	0			0	
			Q _{шк,т}	13,3	13,1	12,77	12,48	12,2	11,89	11,81	12,85	12,15	7,45	0			0	
			Q _{к,т}	2,64	2,69	2,77	2,84	2,91	3,00	2,98	2,82	2,93	4,03	0			0	
РРН-3	Q _{шк} =120 Q _к =29,6	с лотка	V _{шк, м³}	6,47	6,37	6,22	6,08	5,94	5,79	5,75	6,25	5,91	3,62	4,05 (4,0-4,09)	1,0			
			V _{к, м³}	5,29	5,37	5,53	5,69	5,82	6,00	5,96	5,64	5,85	8,06			0	0	
		на колошнике	V _{общ, м³}	11,76	11,74	11,75	11,77	11,76	11,79	11,71	11,89	11,76	11,68	0	0	4,05 (4,0-4,09)	1,0	
			Q _{шк,т}	0	16	21	22	22	20	19	0	0	0	0	0			
			Q _{к,т}	0	0	6,0	6,0	6,1	6,1	6,1	6,1	0	0	0	0			0
			R _{d, т/т}	0	6,17	3,67	3,61	3,28	3,11	0	0	0	0	0	0			

Таблица 2. Показатели работы доменной печи объемом 5500 м³ при разном распределении рудной нагрузки на колошнике

Показатели	При фактической базе с РРН-3			При фактической базе с РРН-2		
	РРН-1 Расч.	РРН-2 Расч.	РРН-3 Факт.	РРН-1 Расч.	РРН-2 Факт.	РРН-3 Расч.
Характер показателей (факт./расчет)						
Удельн. произ-сть, т/м³ сут	1,631	1,668	1,676	1,802	1,833	1,847
Расход кокса, кг/т	417,8	410,1	408,1	418,8	412,6	409,3
Дутье: расход, м³/мин.	6656	6655	6656	7439	7450	7436
температура, град.	1208	1208	1208	1239	1239	1239
кислород, %	25,75	25,75	25,75	25,23	25,23	25,23
Расход тех. кислорода, м ³ /т	74,22	72,56	72,22	67,20	66,12	65,51
Расход природного газа, м ³ /т	97,20	97,20	97,20	95,39	95,39	95,39
% к дутью	9,10	9,31	9,35	8,82	8,97	9,05
Колошниковый газ:						
температура, °С	236,6	206,3	199,8	243,3	215,0	211,8
содержание, % СО	22,26	22,00	21,89	22,21	21,92	21,79
СО ₂	21,24	21,58	21,69	21,00	21,31	21,46
Н ₂	6,74	6,78	6,77	6,56	6,56	6,57
Расход шихты, кг/т:						
Агломерат	1055	1055	1055	1055	1055	1055
Окатыши	499	499	499	499	499	499
Руда	66	66	66	66	66	66
Известняк	24	23	23	33	33	32
Железо в шихте, %	57,78	57,79	57,80	57,60	57,61	57,62
Рудная нагрузка, т/т	3,93	4,01	4,03	3,95	4,01	4,04
В чугуне, %: кремний	0,810	0,81	0,81	0,75	0,75	0,75
марганец	0,303	0,303	0,303	0,301	0,302	0,302
сера	0,018	0,018	0,018	0,017	0,017	0,017
углерод	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91	4,91
В шлаке, %: кремнезем	35,89	35,88	35,88	35,52	35,51	35,51
глинозем	9,96	9,94	9,94	9,79	9,78	9,77
известь	37,32	37,31	37,31	37,95	37,94	37,94
магнезия	10,42	10,45	10,46	10,18	10,20	10,21
оксид марганца	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
сера	0,71	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69
Основность шлака	1,040	1,04	1,04	1,068	1,068	1,068
Количество шлака, кг/т	324	323	323	332	331	331
Расчетные параметры:						
Расход дутья, м ³ /т	1068	1044	1040	1081	1064	1054
Объем влаж. газа	1704	1673	1666	1715	1692	1679
Теор. тем-ра горения, °С	2072	2062	2059	2089	2082	2078
Кол-во фурмен. газа, м ³ /т	1567	1536	1530	1571	1549	1537
Кол-во сух. кол. газа, м ³ /т	1599	1567	1559	1614	1589	1576
Прямое восст-е оксида Fe, %	27,68	27,74	27,58	29,09	28,80	28,74
η _{СО} , %:	48,83	49,51	49,76	48,60	49,29	49,62

Показатели	При фактической базе с РРН-3			При фактической базе с РРН-2		
	РРН-1 Расч.	РРН-2 Расч.	РРН-3 Факт.	РРН-1 Расч.	РРН-2 Факт.	РРН-3 Расч.
Характер показателей (факт./расчет)						
Степень использования H_2 , %	48,59	49,28	49,53	48,31	48,99	49,33
Степень использ-ия общая	48,77	49,46	49,71	48,54	49,22	49,55
Расход углерода, кг/т: общ.	363,7	356,9	355,2	364,5	359,1	356,2
Сжигаемый у фурм из кокса	248,5	241,7	240,4	246,3	241,6	238,9
Прямое восст-е железа и легир.	64,1	64,1	64,1	66,5	66,5	66,5
Общий приход тепла, кДж/кг	4258	4153	4131	4323	4247	4204
в т. ч.: горение кокса	2438	2372	2358	2417	2370	2343
тепло дутья и доб.	1783	1744	1736	1869	1840	1823
Потребность тепла, кДж/кг	3246	3241	3236	3341	3330	3326
в т. ч.:						
восстан-е Fe и л/в элементов	703	704	700	744	737	736
восстан-е легир-их и перевод серы в шлак	268	268	267	256	255	255
разлож. карбонатов и испар. влаги шихты	86	83	83	115	113	112
теплосодерж. чугуна	1249	1249	1249	1250	1250	1250
теплосодерж. шлака	590	588	587	605	603	602
работа расширения газа	350	350	349	371	371	371
Теплосодержание кол. газа	661	564	544	686	596	583
Остаточное тепло	352	347	351	296	321	295
Доля полезного тепла, %	76,22	78,06	78,34	77,28	78,41	79,12
Отношение водяных чисел	0,807	0,814	0,815	0,809	0,814	0,817
Теплотвор. кол. газа, кДж/м ³	3546	3517	3503	3519	3484	3468
Скорость газов, м/сек:						
на кол-ке при норм. усл	1,796	1,803	1,804	1,997	2,004	2,004
при факт. усл-ях	1,019	0,962	0,950	1,144	1,086	1,078
в шахте при норм. усл-ях	0,986	0,990	0,991	1,097	1,101	1,101
при факт. усл-ях	1,449	1,451	1,451	1,605	1,608	1,605
Газопроницаемость: общая	16,3	16,2	16,1	19,1	19,0	18,9
верха	31,7	31,4	31,3	38,5	38,1	38,0
низа	11,9	11,9	12,0	13,8	13,9	13,8
Интенсивность, кг кокса/м ³ сут	678	680	680	750	752	752
То же по рудной сыпи	2628	2688	2701	2903	2954	2977
Дутьевая струя у фурм: скорость, м/сек	203,1	203,8	204,0	226,9	227,7	227,6
температура, °С	1282	1283	1284	1308	1309	1309
мощность струи, кВт	78,3	78,9	79,0	108,8	109,9	109,6

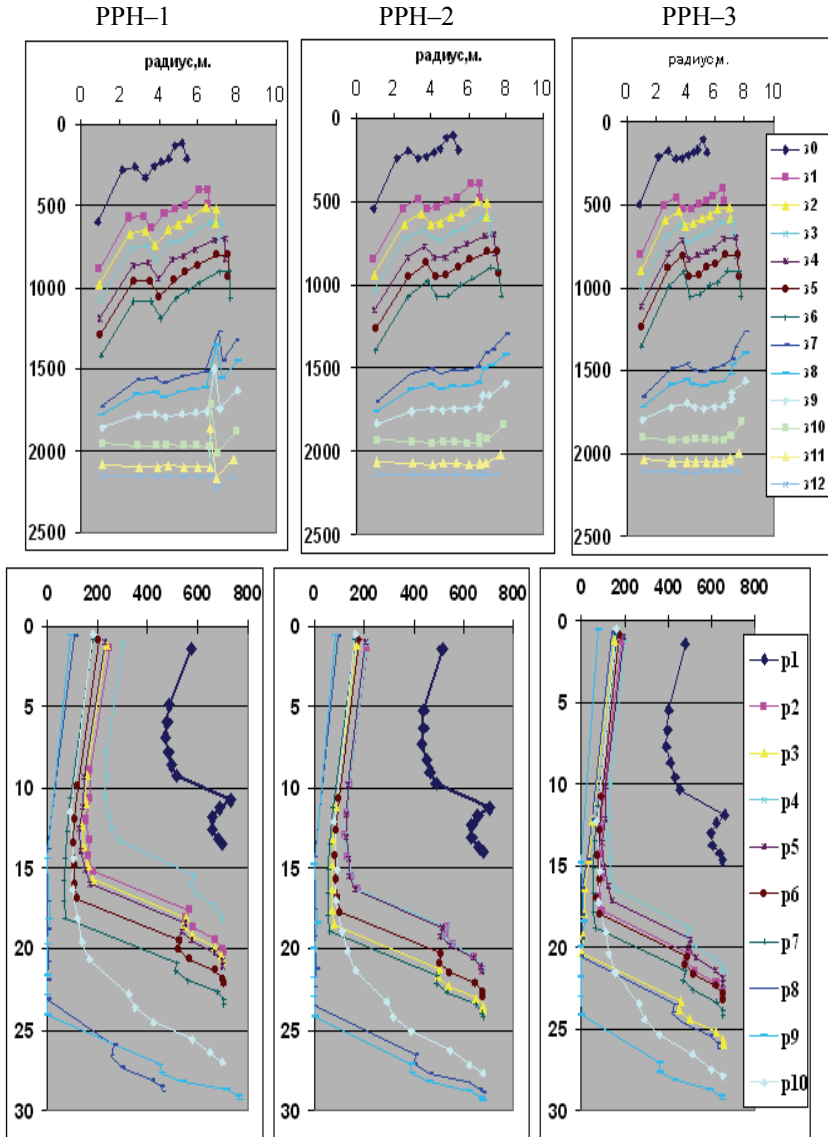


Рис.2. Температура газа по радиусу (ордината, °С) в вертикальных температурных зонах 1–12 (верхние графики) и разность температур газа и шихты по высоте (ордината, м) для радиальных кольцевых зон 1–10 (нижние графики) при распределениях рудной нагрузки на колошнике PPH-1, PPH-2, PPH-3.

Основными факторами сокращения расхода кокса при переходе к более рациональному распределению рудных нагрузок являются: улучше-

ние теплопередачи, которое в конечном итоге выражается в уменьшении температуры колошникового газа; уменьшение теплопотребности на прямое восстановление за счет снижения его доли и повышения степени использования газов; уменьшение удельных теплопотерь через стенки за счет подгрузки периферии железосодержащими.

Улучшение радиального распределения газов при переходе к рациональному распределению рудных нагрузок способствует тому, что уменьшается количество РКЗ, в которых верхняя ступень теплообмена вырождается. Вырождение верхней ступени увеличивает общую потребность топлива на компенсацию увеличенной теплопотребности. На рис.2 (нижние графики), отображающем изменение разности температур газа и шихты по высоте столба шихты, незавершенность выражается в том, что в РКЗ с высокой рудной нагрузкой и малым количеством газа уже на нижней границе ВТЗ–1 с температурой 400°C теплопередача заторможена из-за малой разности температур газа и шихты по всей высоте столба. В расположенных ниже горизонтах создается дефицит теплоты, который должен компенсироваться высокотемпературной теплотой этих зон при увеличении высоты низкотемпературных зон. Рациональное перераспределение РН по радиусу ослабляет этот процесс и способствует общему улучшению теплопередачи с уменьшением средней температуры на колошнике.

Физико–химический механизм уменьшения степени прямого восстановления можно проследить по результатам моделирования, приведенным в табл.3. Характерно, что максимальное развитие прямого восстановления часто имеет место в РКЗ–1 (центральная), а минимальное – всегда в РКЗ–10 (периферийная). При переходе к рациональному распределению рудных нагрузок происходит сближение значений степени прямого восстановления в РКЗ–2–9 и чаще всего некоторое уменьшение степени прямого восстановления в РКЗ–1 и РКЗ–10. Это положительно влияет на расход топлива не только непосредственно через уменьшение общей степени прямого восстановления, но и через перераспределение (выравнивание) теплопотребности между РКЗ–2–9. Сокращение теплопотерь печи при улучшении распределения РН в решающей мере зависит от величин рудной нагрузки на периферии.

Выбор рациональных распределений рудной нагрузки определяется возможностями распределения их величин в РКЗ 2–9 при максимально–возможной рудной нагрузке у периферии. Реальность достижения наилучших результатов зависит при этом от возможности развития осевой «отдушины», которая определяется качеством кокса (особенно загружаемого в центр), железорудного сырья, выбором дутьевых параметров и других технологических факторов.

Таблица 3. Развитие степени прямого восстановления железа (%) в радиальных кольцевых зонах (РКЗ № 1–10) в зависимости от распределения рудных нагрузок (РРН) в этих РКЗ на доменной печи № 5 «Северсталь»

РН	№№ Радиальных кольцевых зон										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Общее
РРН–1	33,07	29,80	28,92	26,27	28,94	30,28	32,55	35,61	31,67	14,24	27,68
РРН–2	31,39	28,28	31,50	28,11	27,00	30,36	31,97	30,83	28,52	12,57	27,74
РРН–3	29,27	29,51	34,21	25,80	27,88	29,76	30,32	33,01	26,53	11,24	27,58

Заключение. Выполненное по разработанной ИЧМ методике расчетно–аналитическое исследование процессов по высоте и поперечному сечению доменной печи в ходе экспериментального изучения распределения материалов на колошнике позволило осуществить научно обоснованный выбор рациональных параметров загрузки на основе выявленных закономерностей развития процессов и количественной оценки их влияния на показатели плавки. Дальнейшее совершенствование параметров загрузки шихты определяется возможностями установления рационального распределения величин рудных нагрузок в каждой из радиальных кольцевых зон, включая как осевую и периферийную «отдушины», так и максимально нагруженные рудными компонентами зоны, в зависимости от дутьевого режима и шихтовых условий плавки.

1. *Большаков В.И.* Теория и практика загрузки доменных печей.– М.: Металлургия, 1990.–256 с.
2. *Результаты* внедрения алгоритма «Траектория» в составе АСУ загрузки доменной печи /В.И.Большаков, А.Ю.Зарембо, Н.А.Гришкова //Автоматизация технологических процессов и управления производством в черной металлургии. МЧМ СССР.–М. Металлургия, 1987.– С.30–33.
3. *Товаровский И.Г., Большаков В.И.* Методика численного анализа процессов доменной плавки в радиальных кольцевых сечениях по высоте печи //Черные металлы. – Март 2006.– С.23–29.
4. *Товаровский И.Г., Большаков В.И.* Аналитическое исследование параметров доменной плавки при разном распределении рудной шихты и кокса по радиусу колошника //Черные металлы. – Январь 2007.– С.

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