

УДК 669.162.24:669.162.262.58

**В.И.Большаков, Ю.С.Семенов, В.В.Лебедь, Е.И.Шумельчик,  
В.И.Вишняков**

**МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИХТОВЫХ  
МАТЕРИАЛОВ НА КОЛОШНИКЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ,  
ОБОРУДОВАННОЙ БЗУ**

Представлены основные положения разработанной в последние годы в ИЧМ математической модели радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, оборудованной БЗУ. Показаны допущения, принятые в модели, ее возможности, пути совершенствования, а также особенности адаптации к фактическим условиям конкретных объектов. Адаптация модели осуществлялась на основе оценки взаимосвязи расчетных рудных нагрузок с содержанием  $\text{CO}_2$  в радиальном газе, а также оценки достоверности расчета показателей.

**доменная печь, бесконусное загрузочное устройство, математическая модель, программа загрузки, радиальное распределения, шихтовые материалы.**

**Современное состояние вопроса.** Оптимизация распределения шихты в доменной печи (ДП) является важным средством достижения высокой производительности при минимальном расходе кокса и увеличении длительности межремонтных периодов работы [1]. Характер распределения шихтовых материалов по радиусу колошника доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ) лоткового типа, определяется параметрами режима загрузки: программой загрузки, уровнем засыпи, видом и массой порций загружаемых материалов, режимом работы лоткового распределителя (скорость и направление вращения, рабочие углы наклона), а также расположением компонентов шихты в бункерах загрузочного устройства [2–8].

Структура, состав и математическое описание известных моделей существенно отличаются и изменяются в зависимости от решаемых задач и используемых разработок [9]. Моделирование распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи необходимо для определения структуры столба шихты и его изменений при различных режимах работы, для определения показателей распределения – рудных нагрузок и объемов материалов по радиусу колошника [1]. Модель распределения шихтовых материалов должна учитывать режим формирования структуры многокомпонентных порций на шихтоподаче, их трансформацию при загрузке в бункеры БЗУ и выгрузке в доменную печь, движение потока шихты по трактам загрузочного устройства и в колошниковом пространстве, их распределение на поверхности засыпи, перераспределение материалов и движение при опускании столба шихты [9,10].

Созданная в последние годы в ИЧМ математическая модель радиального распределения шихтовых материалов является результатом много-

летних разработок отдела технологического оборудования и систем управления Института. Модель позволяет определить показатели распределения (рудные нагрузки и объемы материалов), а также распределение компонентов шихтовых материалов в равных по площади зонах колошника, что является важной информацией, служащей для обоснованной корректировки существующих и выбора рациональных программ загрузки печей, оснащенных БЗУ.

**Целью настоящей работы** является представление основных положений математической модели радиального распределения шихтовых материалов на колошнике, принятых допущений, ее возможностей, направлений совершенствования, а также особенностей адаптации к фактическим условиям конкретных технологических объектов.

**Основные результаты исследований.** Структурная схема разработанной модели представлена на рис.1.

Входными данными математической модели являются:

1. Параметры доменной печи:

- идентификатор технологического объекта (номер доменной печи и название металлургического предприятия);
- объем доменной печи;
- заданный уровень засыпи шихты в доменную печь;
- высота колошника доменной печи;
- радиус колошника доменной печи;
- угол наклона образующей шахты доменной печи;
- скорости опускания шихтовых материалов в равных по площади зонах.

2. Параметры БЗУ:

- длина лоткового распределителя шихты;
- радиус сечения лотка;
- расстояние от нижней образующей лотка до оси его подвеса;
- значения углов наклона лотка в рабочих угловых позициях;
- расстояние от оси подвеса лотка до технологического нуля;
- скорость вращения лотка;
- скорость вылета материала из центральной трубы;
- протяженность участков рабочей поверхности лотка с разными коэффициентами трения.

3. Характеристики загружаемых в доменную печь шихтовых компонентов:

- тип шихтового компонента по технологическим свойствам (коксовый или железорудный материал);
- насыпная плотность;

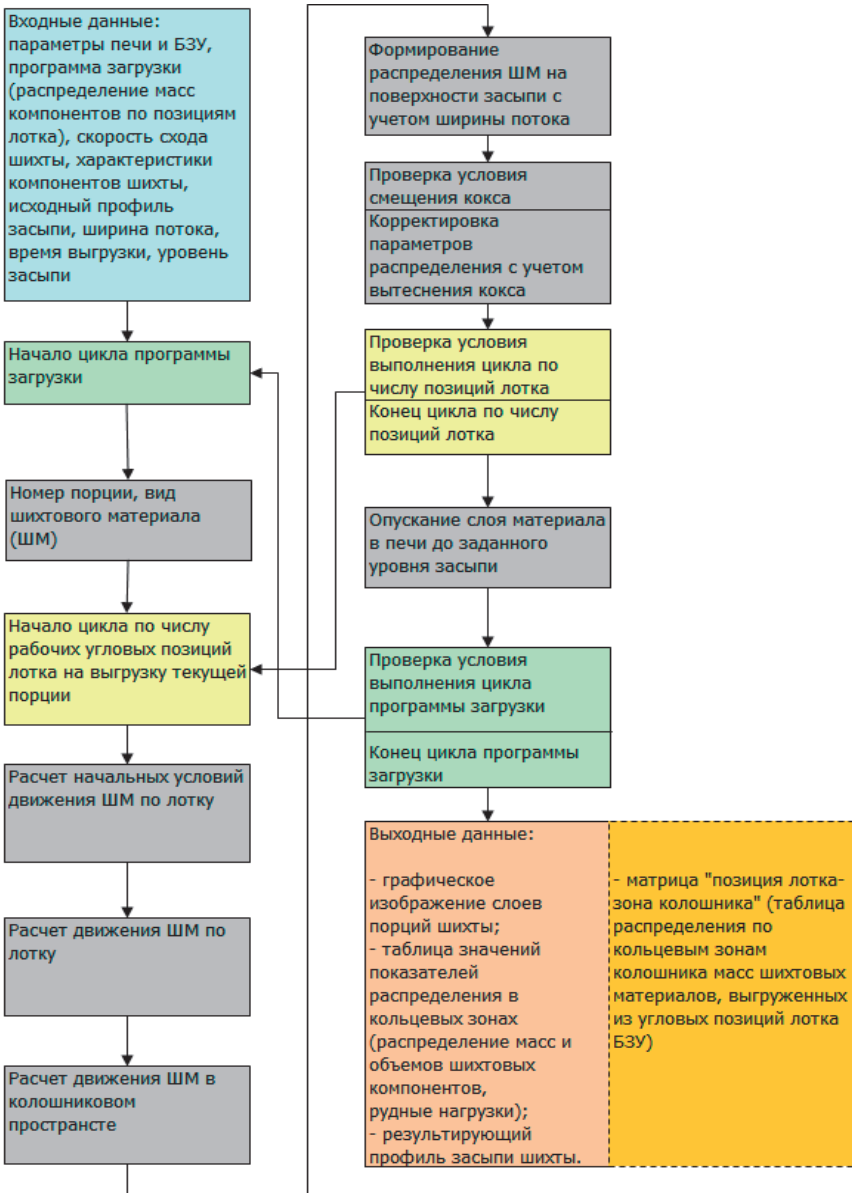


Рис.1. Структурная схема модели радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, оборудованной БЗУ.

– углы откоса материалов к стенке и к оси печи.

4. Параметры исходного профиля засыпи.

5. Программа загрузки:

- количество порций в цикле загрузки;
- масса и время выгрузки порций;
- количество и диапазон рабочих угловых позиций лотка, применяемых для выгрузки порций шихтовых материалов в печь;
- распределение масс порций по угловым положениям лотка;
- соотношение компонентов шихты в угловых положениях лотка.

В модель заложена возможность работы с 10 различными видами материалов (рис.2), основные характеристики которых – насыпной вес, углы откоса материалов к стенке и к оси печи. Также в интерфейсе модели имеется возможность задания основных параметров печи (рис.3), программы загрузки с указанием многокомпонентности, перечня позиций с массой позиции и долей материалов (рис.4) и параметров исходного профиля поверхности засыпи (рис.5).

Перед началом моделирования выбираются доменная печь, программа загрузки, исходный профиль поверхности засыпи. Моделирование осуществляется поэтапно по участкам движения материала: движение в центральной трубе и падение материалов на лоток, движение по лотку, движение в колошниковом пространстве, формирование слоев на поверхности засыпи.

Расчеты базируются на основных кинематических уравнениях скорости и расстояния, с учетом сил, действующих на частицу потока шихтовых материалов. В модели принято допущение, что поток шихтовых материалов движется аналогично материальной точке, считающейся частицей потока. Движение потока шихтовых материалов по центральной трубе зависит от индивидуальной конструкции верхних трактов БЗУ (центральной трубы, шихтового затвора, расположения и количества бункеров).

Код	Обозначение	Материал	Тип	Насыпн. вес	К оси (уг)	К стенке
1	A	Агломерат	1	1.700	23.000	13.000
2	O	Окатыши	1	1.950	23.000	13.000
3	K	Кокс	0	0.500	25.000	15.000
4	Шо	Шлак обогащенный	1	1.600	23.000	13.000
5	Скрап	Скрап чугунистый	1	2.200	23.000	13.000
6	Изв	Известняк	1	1.300	23.000	13.000
7	Антр	Антрацит	0	0.800	25.000	15.000
8	Орек	"Орек" (коксик)	0	0.500	25.000	15.000
9	Кось	Осевои кокс	0	0.500	15.000	15.000
10	P	Руда железная	1	1.900	23.000	13.000

Рис.2. Перечень шихтовых материалов

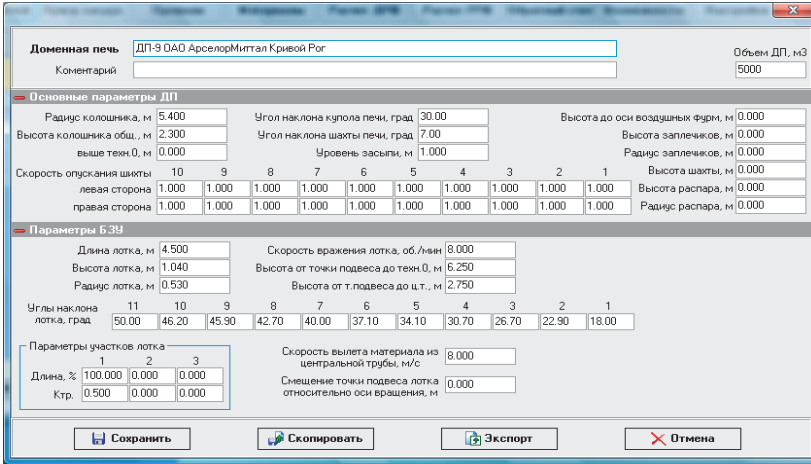


Рис.3. Конструктивные особенности доменной печи и БЗУ

Доменная печь		Кол-во порций	Масса кокса	Масса руды	Примечание										
ДП-9 ОАО АрселорМиттал Кривой Рог		10	114.414 т	420.192 т	14-15.01.08										
№ по т	Выср.	Порция	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	Всего	Комментарии
+	10	100 с АШЩантро			18.404	28.150	17.721	12.298	9.905	15.981	2.957			105.016	
+	9	100 с КСкрап 8-4				3.072	4.108	4.573	4.694	5.118				21.565	
+	8	100 с АШЩИзвАн			18.348	25.806	17.704	10.002	9.866	18.435	3.980			104.141	
+	7	100 с АКСкрапПре				2.376	4.629	4.645	4.874	6.070				22.594	
+	6	100 с Кось 2-1										3.029	10.740	13.769	
+	5	100 с АШЩантро			18.348	28.037	17.648	11.062	9.832	17.706	2.117			104.750	
+	4	100 с КШСкрап 8				3.180	3.956	4.570	4.829	5.048				21.583	
№ пози	Масса материал	А	О	К	Шо	Скрап	Изв	Антр	Орек	Кось	Р	Всего	Комментарии		
8	3.180 т			80.41 %	0.03 %	19.56 %						100.00 %			
7	3.956 т			80.41 %	0.03 %	19.56 %						100.00 %			
6	4.570 т			80.41 %	0.03 %	19.56 %						100.00 %			
5	4.829 т			80.41 %	0.03 %	19.56 %						100.00 %			
4	5.048 т			80.41 %	0.03 %	19.56 %						100.00 %			
	21.583 т														
+	3	100 с АШЩИзвАн			18.740	26.218	18.091	11.197	9.957	17.822	3.914			106.939	
+	2	100 с КШСкрап 8				2.545	4.301	4.857	5.034	5.043				21.780	
+	1	100 с Кось 2-1									2.921	10.547		13.468	
			0.000	0.000	73.840	119.384	88.158	63.204	58.991	91.223	12.968	5.950	21.287	534.605	

Рис.4. Программа загрузки доменной печи

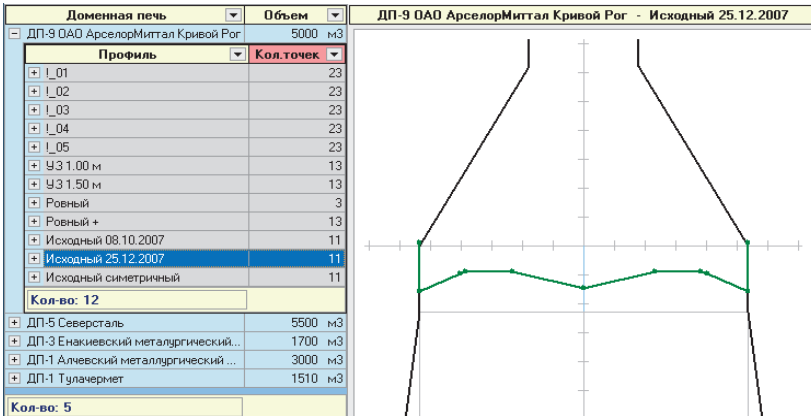


Рис.5. Исходный профиль поверхности засыпки.

Универсально учесть все варианты конструкций БЗУ невозможно, поэтому авторами принято начинать моделирование с условной точки в центральной трубе. В модели также принято допущение, что поток шихтовых материалов в центральной трубе движется по центральной оси печи, без смещения. Следовательно, движение шихтовых материалов до лоткового распределителя БЗУ представляет собой свободное падение материала в центральной трубе из исходной (заданной) точки в точку, расположенную на поверхности лоткового распределителя, с заданными начальными условиями движения.

Движение потока шихтовых материалов по лотковому распределителю БЗУ описывается как движение частицы по вращающейся криволинейной поверхности с заданной начальной скоростью движения (рис.6). В зависимости от текущего угла наклона лотка рассчитывается путь, проходимый потоком шихтовых материалов по лотку. В результате суммирования векторов сил, действующих на поток, и решения системы кинематических уравнений рассчитываются характеристики движения потока шихтовых материалов в точке отрыва от лотка. Следует отметить, что при расчете могут быть учтены разные коэффициенты трения на различных участках лотка.

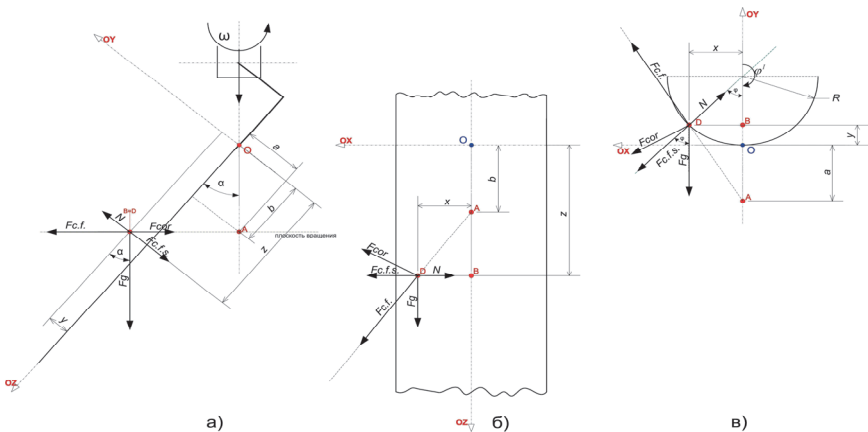


Рис.6. Схема к расчету сил, действующих на материальную точку при движении ее по лотку.  $\alpha$  – угол наклона лотка, град.;  $\varphi$  – угол смещения материальной точки по желобу лотка, град.;  $\omega$  – угловая скорость вращения лотка, об/мин;  $\varphi'$  – угловая скорость движения материальной точки по желобу лотка, об/мин;  $R$  – радиус желоба лотка, м;  $a$  – проекция лотка на плоскость  $YOZ$ ;  $b$  – проекция лотка на плоскость  $XOZ$ ;  $v$  – проекция лотка на плоскость  $XOY$ ;  $F_g$  – сила тяжести;  $F_{c.f}$  – центробежная сила от угловой скорости вращения лотка;  $F_{cor}$  – сила Кориолисова;  $F_{c.f.s}$  – центробежная сила от угловой скорости движения материальной точки по желобу лотка;  $N$  – сила реакции опоры;

Поток шихтовых материалов в колошниковом пространстве движется по траектории полета твердого тела, направленного под углом к горизонту. Начальные условия движения рассчитываются на предыдущем этапе, в точке отрыва от лотка. Движение происходит по параболической траектории, пересечение траектории с текущим профилем шихты на колошнике определяет точку встречи центра потока шихтовых материалов с поверхностью засыпи.

Формирование слоя шихтовых материалов на поверхности засыпи происходит поэтапно. На первом этапе формируется геометрическая фигура, которая соответствует вертикальному разрезу формируемого слоя с учетом углов откоса загружаемой смеси, ширины потока и конфигурации исходного профиля. Затем, фигура итерационно перестраивается на подобную – увеличенную, до тех пор, пока рассчитанный объем фигуры вращения вокруг оси колошника не достигнет объема выгружаемых шихтовых материалов. Описанный процесс повторяется для каждого положения лотка при загрузке очередной порции программы загрузки.

Основным результатом моделирования является многомерная матрица «позиция лотка – зона колошника – порция программы загрузки – вид материала» (рис.7). Поскольку эту матрицу сложно визуализировать в целом, то отображаются различные ее проекции: сводная таблица основных параметров распределения по зонам колошника (рис.8), распределение по зонам колошника из угловых позиций лотка для коксовых и рудных компонентов для конкретной порции, либо за цикл загрузки (рис.9), изображение конфигурации слоев (рис.10), график рудных нагрузок (рис.11). Также при необходимости можно извлекать любые другие расчетные параметры (профили каждого слоя шихты и т.д.).

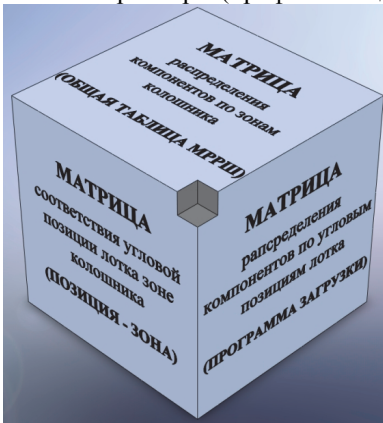


Рис.7. Условная схема многомерного матричного представления распределения различных видов материалов по угловым позициям лотка и кольцевым зонам колошника

Номер кольца	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Сумма
Относительная скорость с	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
R границ зон, м	5.400	5.123	4.830	4.518	4.183	3.818	3.415	2.958	2.415	1.708	
R середин зон, м	5.261	4.976	4.674	4.350	4.001	3.617	3.186	2.686	2.061	0.854	
Масса А, т	38.272	37.764	35.655	33.285	28.200	27.410	29.438	33.099	32.909	23.275	319.306
Масса О, т	9.216	9.093	8.581	8.005	6.774	6.583	7.076	7.980	7.946	5.607	76.862
Масса К, т	7.356	7.792	8.503	9.197	10.356	9.727	8.594	4.882	1.789	1.500	69.697
Масса Шо, т	0.821	0.810	0.764	0.713	0.604	0.587	0.630	0.710	0.706	0.499	6.844
Масса Скрап, т	1.771	1.875	2.046	2.214	2.493	2.341	2.069	1.175	0.430	0.361	16.776
Масса Изв, т	0.048	0.048	0.047	0.044	0.038	0.037	0.040	0.046	0.041	0.015	0.404
Масса Антр, т	0.954	0.941	0.888	0.828	0.701	0.681	0.732	0.825	0.822	0.582	7.955
Масса Орех, т	1.142	1.126	1.064	0.993	0.842	0.819	0.879	0.988	0.981	0.691	9.525
Масса Кось, т	0.000	0.000	0.044	0.395	1.108	2.044	2.715	4.544	6.988	9.399	27.237
Масса Р, т	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
M рудной части, т	50.128	49.589	47.094	44.261	38.108	36.959	39.253	43.011	42.032	29.757	420.192
M коксовой части, т	9.452	9.859	10.499	11.414	13.007	13.270	12.920	11.240	10.580	12.173	114.413
PH, т/т	5.304	5.030	4.486	3.878	2.930	2.785	3.038	3.827	3.973	2.445	3.673
Отн. PH, PH/Рср	1.444	1.369	1.221	1.056	0.798	0.758	0.827	1.042	1.082	0.666	3.673
V рудной части, м3	28.594	28.272	26.818	25.170	21.602	20.959	22.310	24.576	24.102	17.054	239.457
V коксовой части, м3	18.188	19.013	20.332	22.207	25.488	26.029	25.291	21.861	20.543	23.909	222.861
У суммарный, м3	46.782	47.285	47.151	47.377	47.090	46.989	47.601	46.436	44.645	40.963	462.318
У профиля после выгрузки	0.968	0.901	0.916	0.862	0.891	0.911	0.837	0.937	1.184	1.699	

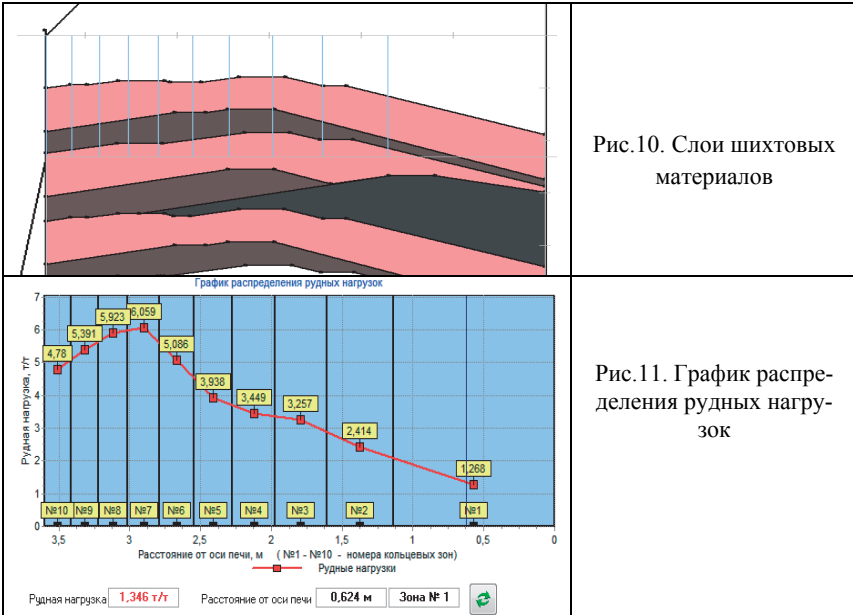
Рис. 8. Распределение компонентов по зонам.

По массе (рудные компоненты)		По массе (коксовые компоненты)									
Угловое положение лс	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Сумма
Положение лотка 11											
Положение лотка 10											
Положение лотка 09	34.591 т	23.434 т	11.596 т	1.151 т							70.772 т
Положение лотка 08	14.644 т	24.541 т	27.321 т	24.964 т	12.505 т	1.993 т					105.968 т
Положение лотка 07	0.600 т	1.322 т	7.567 т	16.525 т	16.877 т	14.822 т	4.207 т	3.285 т	2.868 т	3.598 т	71.670 т
Положение лотка 06	0.100 т	0.100 т	0.417 т	1.368 т	7.397 т	9.415 т	9.014 т	9.014 т	5.719 т	3.947 т	46.491 т
Положение лотка 05	0.106 т	0.106 т	0.166 т	0.166 т	1.033 т	7.945 т	10.371 т	9.796 т	8.181 т	4.051 т	41.861 т
Положение лотка 04	0.087 т	0.087 т	0.087 т	0.087 т	0.297 т	2.784 т	15.661 т	20.293 т	19.550 т	12.452 т	71.384 т
Положение лотка 03								0.622 т	5.714 т	5.710 т	12.046 т
Положение лотка 02											
Положение лотка 01											
И Т О Г О :	50.128	49.589 т	47.094	44.261 т	38.108	36.959	39.253 т	43.011 т	42.032	29.757 т	420.192 т

Рис. 9. Матрица «позиция – зона».

На базе классического моделирования распределения шихтовых материалов на колошнике, существует возможность моделирования перекоса столба шихты при выгрузке на асимметричный профиль, расчета значений углов лотка с целью попадания центра потока материала в средину равновеликих зон на заданном уровне засыпи. При моделировании могут задаваться различные скорости опускания шихтовых материалов по зонам, различные уровни засыпи и углы откоса материалов в кольцевых зонах для каждой порции в цикле загрузки печи, различные варианты вытеснения кокса к оси при выгрузке на него железосодержащей порции, различные величины ширины потока материала.





Адаптация модели осуществлялась для условий работы ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог», ДП №4 и ДП №5 ОАО «Северсталь», ДП №1 ПАО «Алчевский металлургический комбинат» и ДП №3 ПАО «Енакиевский металлургический завод» на основе оценки взаимосвязи расчетных рудных нагрузок, полученных с помощью модели, с содержанием  $\text{CO}_2$  в радиальном газе, а также оценки достоверности расчета показателей распределения по степени взаимосвязи измеренного с помощью профиломера, установленного на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» фактического профиля поверхности засыпи и полученного в результате моделирования.

Представленная модель радиального распределения шихтовых материалов по радиусу колошника доменной печи открыта для дальнейшего совершенствования с использованием дополнительных исходных данных и уточнения применяемых алгоритмов расчета. Дальнейшее развитие и совершенствование модели будет осуществляться на основании опыта ее применения на доменных печах с использованием различных программ загрузки и режимов доменной плавки.

**Заключение.** Разработанная в ИЧМ математическая модель радиального распределения шихтовых материалов является результатом многолетних исследований. Модель позволяет определить показатели распределения (рудные нагрузки и объемы материалов), а также распределение компонентов шихтовых материалов в равных по площади кольцевых зо-

нах колошника. Адаптация модели осуществлялась на основе оценки взаимосвязи расчетных рудных нагрузок с содержанием  $\text{CO}_2$  в радиальном газе, а также оценки достоверности расчета показателей распределения по степени взаимосвязи измеренного с помощью профилемера, установленного на ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» фактического профиля поверхности засыпи и полученного в результате моделирования. Математическая модель может быть дополнена новыми возможностями с применением дополнительных исходных данных, уточнений используемых коэффициентов и алгоритмов.

1. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / В.И.Большаков – К.: Наук. думка, 2007. – 412с.
2. *Исследование* влияния конструктивных особенностей загрузочных устройств на распределение шихты в доменной печи / В.И.Большаков, И.Е.Варивода, Н.А.Рослик, С.Т.Шулико, Ф.М.Шутылев // Сталь. -1999. -№1. – С.10–14.
3. *Большаков В.И., Зарембо А.Ю., Сало А.С.* Методика расчета параметров схода шихты с распределительного лотка. // Вопросы производства чугуна в доменных печах. Тр. ИЧМ, М.: Металлургия. 1984. – С.60–64.
4. *Большаков В.И., Зарембо А.Ю.* Траектории движения шихты в колошниковом пространстве современной доменной печи // Бюл. Черная металлургия. Черметинформ. 1985. Вып. 20 (1000). – С.35–37.
5. *Большаков В.И., Зарембо А.Ю.* Особенности истечения шихтовых материалов из бункера БЗУ // Металлургия и коксохимия. К.: Техника. 1985, Вып. 88. – С.31–34.
6. *Большаков В.И., Зарембо А.Ю.* Влияние уровня загрузки на распределение шихты в доменной печи. // Вопросы теории и практики производства чугуна. Тр. ИЧМ. М.: Металлургия. 1986. С.70–75.
7. *Пат. на изобретение Украина, UA 94139 С2.* Способ ведения доменной плавки / В.И.Большаков, Ф.М.Шутылев, Н.А.Гладков, В.В.Лебедь, Ю.А.Богачев, И.Г.Муравьева – заявл. 07.07.09; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7, 2011 г.
8. *Большаков В.И., Зарембо А.Ю., Гришкова А.А.* Результаты внедрения алгоритма «Траектория» в составе АСУ загрузкой доменной печи // Автоматизация технологических процессов и управление производством в черной металлургии. Тр. ВНИИАЧермет. М. 1987. – С.30–33.
9. *Математические модели радиального распределения шихты в доменных печах* / [В.И.Большаков, И.Г.Муравьева, Е.А.Белашапка, И.Е.Варивода] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2004. – Вып. 8. – С.86–102.
10. *Оценка распределения компонентов железорудной части шихты по радиусу колошника доменной печи №1 ОАО «АМК»*/ [Н.Г.Иванча, И.Н.Вишнякова, В.И.Вишняков, Ю.С.Семенов] – Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2008. – Вып. 18. – С.47–57.

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук И.Г.Муравьевой*

*В.І.Большаков, Ю.С.Семенов, В.В.Лебідь, Є.І.Шумельчик, В.І.Вишняков*

**Модель радіального розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі, що обладнана БЗП**

Представлено основні положення розробленої останніми роками в ІЧМ математичної моделі радіального розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі, що обладнана БЗП. Показано допущення, що прийнято в моделі, її можливості, шляхи вдосконалення, а також особливості адаптації до фактичних умов конкретних об'єктів. Адаптацію моделі здійснено на основі оцінки взаємозв'язку розрахункових рудних навантажень з вмістом  $\text{CO}_2$  в радіальному газі, а також оцінки достовірності розрахунку показників.