

**И.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, Ф.М.Шутылев, Е.И.Шумельчик,  
С.Т.Шулико, Ю.А.Богачев**

### **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ВЫТЕСНЕННОГО КОКСА ПРИ ВЫГРУЗКЕ НА НЕГО ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ ШИХТЫ**

Целью настоящего исследования является разработка метода определения объема вытесненного кокса при выгрузке на него железосодержащих компонентов шихты в доменной печи. Установлено, что объем вытесненного кокса определяется, как массой выгружаемых на него железосодержащих материалов, так и зависит от массы выгруженного кокса. Показано, что разработанный метод может быть использован в составе информационной системы расчета и отображения информации об уровне засыпи, полученной с помощью радиолокационного профилимера, и в составе математической модели радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи.

**доменная печь, выгрузка кокса, распределение, колошник, уровень засыпи**

**Постановка задачи.** Информация о структуре столба, форме и толщине образованных за цикл загрузки слоев шихтовых материалов на колошнике доменной печи, необходима для корректировок программ загрузки печи и для исследований изменения структуры столба шихты по высоте шахты печи. Исследования с помощью системы измерения профиля поверхности засыпи формы слоев шихтовых материалов, образованных за цикл загрузки, и расчет показателей распределения шихты с помощью математического моделирования показали, что объем кокса, вытесненный при выгрузке на него железосодержащих материалов, существенно влияет на распределение рудных нагрузок по радиусу колошника. Это подтверждают расчеты показателей распределения, выполненные на модели радиального распределения шихты ИЧМ для программы загрузки (табл.1) без учета вытесняемого кокса и с заданием значений объемов вытесненного кокса, изменяющихся от 3 до 9%. Результаты расчетов представлены в табл.2 и на рис.1.

Как следует из приведенных в табл.2 и на рис.1 данных, задание различного количества вытесняемого железосодержащими материалами кокса приводит к существенным отклонениям в распределении рудных нагрузок по радиусу колошника, причем максимальные отклонения приходятся на 1-ю, 4-ю и 5-ю равновеликие зоны сечения колошника. Это свидетельствует о том, что объем вытесненного кокса не может задаваться фиксированной величиной в качестве исходных данных при расчете показателей распределения, а должен определяться используемой на печи программой загрузки и, как следствие, конфигурацией, сформированной в результате выгрузки порций шихты, поверхности засыпи.

Таблица 1. Распределение шихтовых материалов по позициям лотка для исследуемой программы загрузки

№ порции	Вид материала	Распределение масс по позициям лотка, т									Всего, т	
		Угловая позиция распределителя										
		9	8	7	6	5	4	3	2	1		
10	КО 2-1									6,49	15,00	21,49
9	АОШо 9-3	16,37	28,79	19,72	13,93	11,84	12,93	4,74				108,31
8	К 8-4		2,48	3,52	3,92	4,53	4,62					19,07
7	АОШо 9-3	16,46	28,72	19,87	11,51	12,06	16,07	5,08				109,77
6	К 8-4		2,13	3,89	4,36	4,70	4,07					19,16
5	КШо 2-1								5,98	14,98		20,95
4	АОШо 9-3	16,34	29,10	19,81	12,67	11,40	14,71	4,28				108,31
3	К 8-4		2,74	3,38	4,00	4,32	4,51					18,94
2	АОШо 9-3	16,41	28,47	20,02	12,59	12,21	15,27	4,81				109,77
1	К 8-4		3,13	2,95	4,24	4,59	4,02					18,94

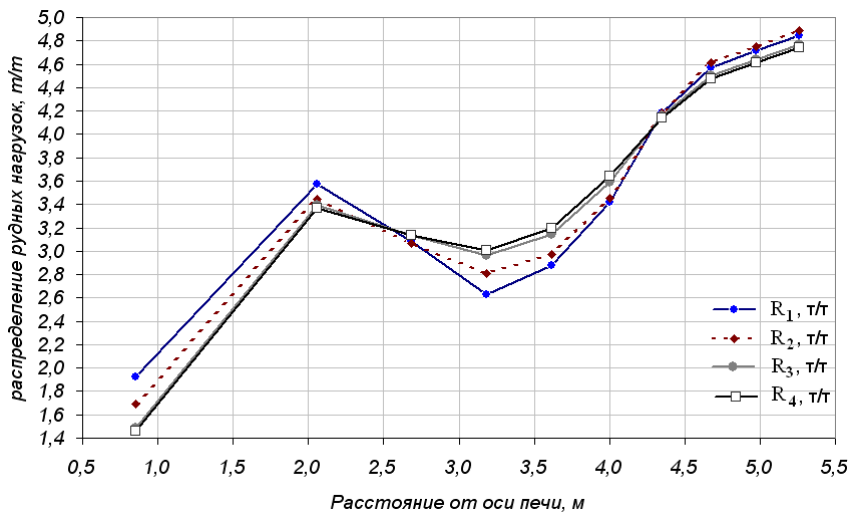


Рис.1. Распределение рудных нагрузок  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  по радиусу колошника для исследуемой программы загрузки печи с заданием объема вытесняемого железосодержащими материалами кокса – 0, 3, 6 и 9% соответственно.

Установленная на ДП №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» система измерения профиля засыпи шихты позволяет определять фактические профили поверхности, образованные после выгрузки порций шихтовых материалов, а также с учетом их изменения в паузах между выгрузкой порций – исходные профили поверхности засыпи.

Таблица 2. Отклонения рудных нагрузок, полученных при задании 3, 6 и 9% объема вытесненного кокса от общей его массы ( $R_{i2}$ ,  $R_{i3}$  и  $R_{i4}$ ) от рудных нагрузок, полученных без учета вытеснения кокса ( $R_{i1}$ )

Варианты отклонений рудных нагрузок	V вытесненного кокса, %	Отклонения рудных нагрузок (т/т) в равновеликих зонах сечения колошника									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		радиус середин зон, м									
		0,85	2,06	2,69	3,19	3,62	4,00	4,35	4,67	4,98	5,26
$R_1$	0	1,922	3,571	3,087	2,629	2,875	3,415	4,182	4,574	4,713	4,847
$\Delta R_{i2}, \%$	3	-0,234	-0,126	-0,016	0,180	0,095	0,041	0,006	0,041	0,041	0,042
$\Delta R_{i3}, \%$	6	-0,440	-0,180	0,049	0,333	0,267	0,180	-0,026	-0,072	-0,076	-0,080
$\Delta R_{i4}, \%$	9	-0,462	-0,203	0,046	0,375	0,320	0,231	-0,045	-0,099	-0,103	-0,106

Как показали результаты исследований с помощью радиолокационного профилемера, профиль поверхности засыпи, образованный при различных программах загрузки после выгрузки порций кокса из угловых позиций лоткового распределителя 8-4 (7-3), в большинстве случаев имеет  $\sim$  образную форму (вариант 1, рис.2) или  $\nabla$  – образную форму (вариант 2, рис.3). Существующая на печах  $\nabla$  – образная форма профиля не является характерной для доменных печей, оборудованных БЗУ, поэтому указанная форма профиля поверхности засыпи в данной работе не рассматривалась.

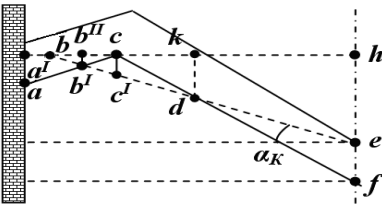


Рис.2. Схема к определению объема вытесненного кокса для варианта 1 профиля поверхности засыпи.

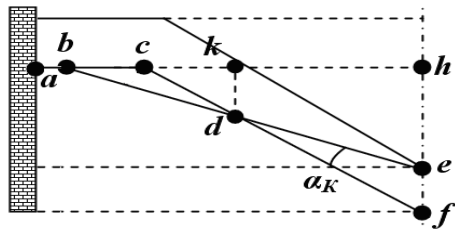



Рис.3. Схема к определению объема вытесненного кокса для варианта 2 профиля поверхности засыпи.

**Целью настоящего исследования** является разработка метода определения объема вытесненного кокса при выгрузке на него железосодержащих компонентов шихты в доменной печи.

**Изложение основных материалов исследования.** Как показали исследования, во время выгрузки на поверхность кокса порций железосодержащих материалов из первых по ходу выгрузки угловых позиций лот-

кового распределителя, при  – образной форме исходного профиля, происходит заполнение железорудными материалами «кармана» в периферийной зоне сечения колошника. При этом следует подчеркнуть, что во время выгрузки железосодержащих порций из угловых позиций 9–7 вытеснения кокса к стенке печи практически не происходит, а имеет место только частичное его смешивание с железосодержащими материалами. Начиная с 6–5-го угловых положений, во время выгрузки железосодержащих материалов на слои кокса, происходит вытеснение кокса по направлению к осевой зоне сечения колошника с частичным его перемешиванием с железосодержащими материалами. Эти положения явились основой для разработки метода определения объема вытесняемого кокса. Как было сказано выше, по результатам исследований принято, что профиль поверхности засыпи перед выгрузкой железосодержащих материалов может иметь две возможные конфигурации, схематически представленные на рис. 2 и 3 (профиль, описываемый отрезками  $ac$  и  $cf$ ). При математическом описании процесса вытеснения кокса принято, что выгружаемая на поверхность кокса порция железосодержащих материалов вытесняет часть его объема, который сосредотачивается в осевой зоне (фигура  $def$ ), причем поверхность вытесненного кокса, описываемая отрезком  $de$ , пересекается с профилем поверхности засыпи, образованным после выгрузки железосодержащих материалов в точке, лежащей на оси печи (точка  $e$ ). Отсутствие железосодержащих материалов в оси печи подтверждено результатами предпусковых исследований на ДП №4 и ДП №5 ОАО «Северсталь» [1]. Для двух вариантов формирования поверхностей, образованных после выгрузки порций железосодержащих материалов на кокс, получены математические зависимости, позволяющие по геометрической конфигурации образованных в результате выгрузки слоев шихтовых материалов определить долю вытесненного под воздействием веса железосодержащих материалов кокса.

**Методы и результаты исследования.** Метод определения объема вытесненного кокса состоит из следующей последовательности операций:

1. Определение с помощью профилемера формы слоев шихты, образованных в результате выгрузки железосодержащих материалов на кокс.

2. Для условий образования формы профиля поверхности засыпи, представленной на рис.2 определяется граничная точка  $b$  фигуры, описывающей объем вытесненного кокса, и находящейся на пересечении отрезков  $bh$  и  $a'h$ . Незвестный параметр  $bh$  определяется в результате решения системы уравнений (1)–(3).

$$V_{b'cd} = -\frac{2 \cdot \pi}{(ch - x_{b'})} \times$$

$$\times \left[ \frac{(ch^2 - x_{b'}^2) \cdot (ch \cdot (y_{b'} - cc') - x_{b'} \cdot y_{b'} - (y_{b'} - cc') \cdot (ch - x_{b'}))}{2} + \right. \quad (1)$$

$$\left. + \frac{cc' \cdot (ch^3 - x_{b'}^3)}{3} \right] - \frac{2 \cdot \pi}{(kh - ch)} \cdot \left[ \frac{kh \cdot cc' \cdot (kh^2 - ch^2)}{2} - \frac{cc' \cdot (kh^3 - ch^3)}{3} \right]$$

$$V_{def} = \frac{\pi}{3} \cdot \left[ ch^2 \cdot hf - \frac{hf \cdot (ch - kh)^3}{ch} - bh^2 \cdot he + \frac{hf^3 \cdot (ch - kh)^3 \cdot bh^2}{ch^3 \cdot he^2} \right] \quad (2)$$

$$V_{b'cd} = V_{def} \quad (3)$$

3. Для формы профиля поверхности засыпи, представленной на рис.3, объем вытесненного кокса определяется следующим образом:

$$V_{def} = \frac{\pi}{3} \cdot \left[ ch^2 \cdot hf - \frac{hf \cdot (ch - kh)^3}{ch} - bh^2 \cdot he + \frac{hf^3 \cdot (ch - kh)^3 \cdot bh^2}{ch^3 \cdot he^2} \right], \quad (4)$$

$$\text{где: } bh = ch \cdot \sqrt{\frac{hf}{he}}; \quad kh = \frac{bh \cdot ch \cdot (he - hf)}{ch \cdot he - hf \cdot bh}.$$

Разработанный метод определения объема вытесненного кокса был опробован для шести периодов работы и программ загрузки печи (табл. 3) с характерными для них слоями шихтовых материалов, определенными с помощью радиолокационного профилемера. Полученные с помощью профилемера слои, образованные в результате выгрузки железосодержащих материалов на кокс, в исследуемые периоды, для которых опробовался метод определения объема вытесненного кокса, представлены на рис.4. В результате расчетов для каждой рассматриваемой программы загрузки для отдельных пар порций в цикле загрузки, выбранных из соотношений максимального отличия масс порций в указанных парах (см.табл.4), получено, что объем вытесненного кокса после выгрузки на него железосодержащих материалов для всех вариантов работы печи в исследуемые периоды изменяется в диапазоне от 0,62 м<sup>3</sup> до 3,63 м<sup>3</sup>, что составляет, соответственно, от 1,05% до 7,05% от общей массы кокса. Полученные результаты представлены в табл.4 и на рис.5 и в достаточной степени согласуются со значениями объемов вытесненного кокса, определенными при проведении исследований перед задувкой доменных печей после проведения капитальных ремонтов I-го разряда [1–7].

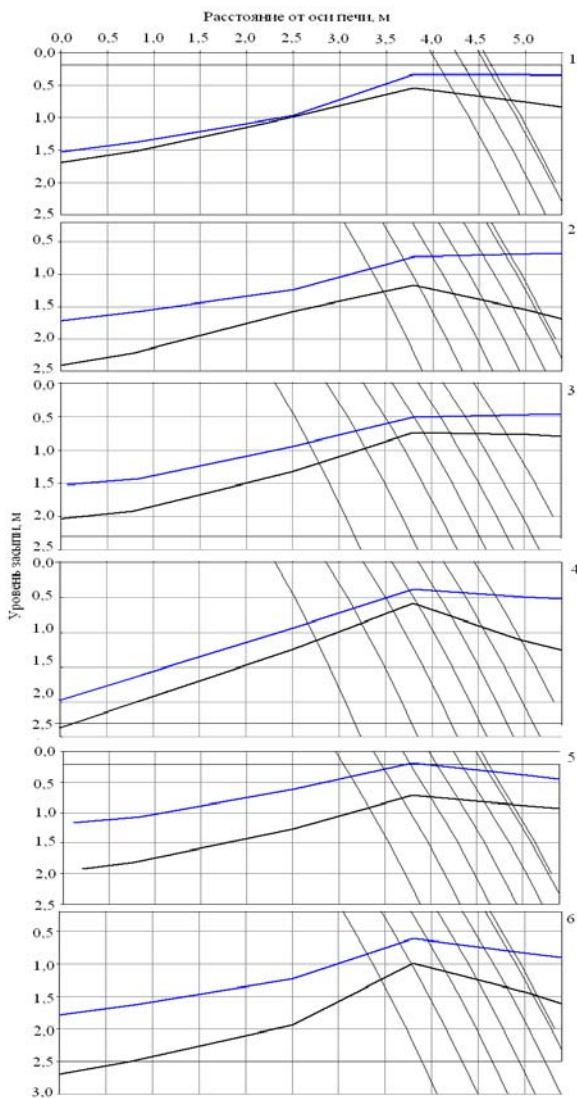


Рис.4. Конфигурация слоев шихты, образованных в результате выгрузки железосодержащих материалов на кокс для шести исследуемых периодов работы печи (1–6, табл. 3). Наклонные линии – траектории центров тяжести потоков шихтовых материалов, сходящих с лотка БЗУ при использовании 9...1 его угловых позиций.

Как следует из приведенных на рис.5 графиков (для периодов 1-3,5 и 6), при увеличении массы порций железорудных материалов, выгружаемых на слои кокса, объем вытесняемого кокса увеличивается. Однако, объем вытесненного кокса определяется не только массой выгружаемых на него железосодержащих материалов, но и зависит от массы выгруженного кокса (рис.5).

Для периода 4 характерным является выгрузка увеличенной массы железорудных материалов на исходный слой кокса уменьшенной массы, по сравнению с другими периодами. Это свидетельствует о том, что помимо формы поверхности засыпи и углов ее откоса, на которых основан разработанный метод, на объем вытесненного кокса существенно влияют массы выгру-

жаемых порций материалов, которые, в свою очередь, и формируют поверхность засыпи шихты.

Таблица 3. Режимы загрузки ДП №9 в анализируемые периоды ее работы

Период работы печи <sup>1)</sup> , (дата)	Программа загрузки: угловые позиции лотка БЗУ: 9...1									
	Шихтовые материалы: А – агломерат, О – окатыши, Ш <sub>О</sub> – шлак обогаченный, К – кокс.									
	Номер порции материалов									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Период 1 <sup>1)</sup> , (16.11.2004)	К 8-4	К 3-1	АШ <sub>О</sub> 9-6	АО 9-3	К <sup>3)</sup> 8-4	А 9-6	АО 6-3	-/-	-/-	-/-
Период 2 <sup>1)</sup> , (24.06.2005)	К 3-1	АШ <sub>О</sub> 9-5	К 8-4	АО 9-3	К 4-1	К 8-4	АШ <sub>О</sub> 9-4	К <sup>3)</sup> 7-3	АО 9-3	-/-
Период 3 <sup>2)</sup> , (29.05.2008)	К 8-4	АОШ <sub>О</sub> 9-3	К <sup>3)</sup> 8-4	АОШ <sub>О</sub> 9-3	К 8-4	КО 2-1	АОШ <sub>О</sub> 9-3	К 8-4	АОШ <sub>О</sub> 9-3	К 2-1
Период 4 <sup>2)</sup> , (05.10.2006)	К 8-4	АОШ <sub>О</sub> 9-3	К <sup>3)</sup> 8-4	АОШ <sub>О</sub> 9-3	КШ <sub>О</sub> 2-1	К 8-4	АОШ <sub>О</sub> 9-3	К 8-4	АОШ <sub>О</sub> 9-3	КО 2-1
Период 5 <sup>1)</sup> , (16.10.2004)	К 3-1	АШ <sub>О</sub> 9-6	К 8-5	АО 9-3	КО 3-1	КШ <sub>О</sub> 8-4	АО 8-4	К <sup>3)</sup> 8-4	АО 9-3	-/-
Период 6 <sup>1)</sup> , (25.03.2005)	К 3-1	А 9-6	К 8-5	АО 9-3	К 3-1	К 8-4	АО 8-4	К <sup>3)</sup> 8-4	АО 9-3	-/-

<sup>1)</sup> Углы наклона лотка БЗУ по позициям: 9-46,2°; 8-45,4°; 7-42,8°; 6-40,1°; 5-37,4°; 4-34,3°; 3-30,9°; 2-26,9°; 1-22,1°;

<sup>2)</sup> Углы наклона лотка БЗУ по позициям: 9-45,9°; 8-42,7°; 7-40,0°; 6-37,1°; 5-34,1°; 4-30,7°; 3-26,7°; 2-22,9°; 1-18,0°; 3) Пара порций в цикле загрузки, для которой опробована методика определения объема вытесненного кокса железосодержащими материалами.

Таблица 4. Изменение объема вытесненного кокса под действием выгруженной на него массы железосодержащих материалов

Исследуемый период, №, дата	1	2	3	4	5	6
	16.11.2004	24.06.2005	29.05.2008	05.10.2006	16.10.2004	25.03.2005
порция железосодержащих материалов, выгружаемая на кокс	А 9-6	АО 9-3	АОШ <sub>О</sub> 9-3	АОШ <sub>О</sub> 9-3	АО 9-3	АО 9-3
порция кокса	К 8-4	К 7-3	К 8-4	К 8-4	К 8-4	К 8-4
M <sub>к</sub> <sup>II</sup> , т	29,65	26,14	22,92	18,94	22,90	25,97
M <sub>жсм</sub> <sup>II</sup> , т	82,12	99,29	106,80	108,57	121,10	121,49
V <sub>вытесненного кокса</sub> , м <sup>3</sup>	0,62	2,43	2,63	1,89	3,23	3,63
V <sub>вытесненного кокса</sub> , %	1,05	4,65	5,70	5,00	7,05	6,99

Зависимость объема вытесненного кокса от отношения масс выгруженных железосодержащих материалов и исходного кокса представлена на рис.6 и может быть с коэффициентом корреляции 0,96 описана функцией:

$$V_{\text{к}} = -1,2564 \left( \frac{M_{\text{жсжм}}}{M_{\text{к}}} \right)^2 + 12,239 \frac{M_{\text{жсжм}}}{M_{\text{к}}} - 23,357, \quad (5)$$

где  $V_{\text{к}}$  – объем вытесненного кокса, %;  $M_{\text{к}}$  – масса кокса, т;  $M_{\text{жсжм}}$  – масса железосодержащих материалов, выгружаемых на кокс, т;

Полученная зависимость может быть уточнена при проведении дополнительных исследований.

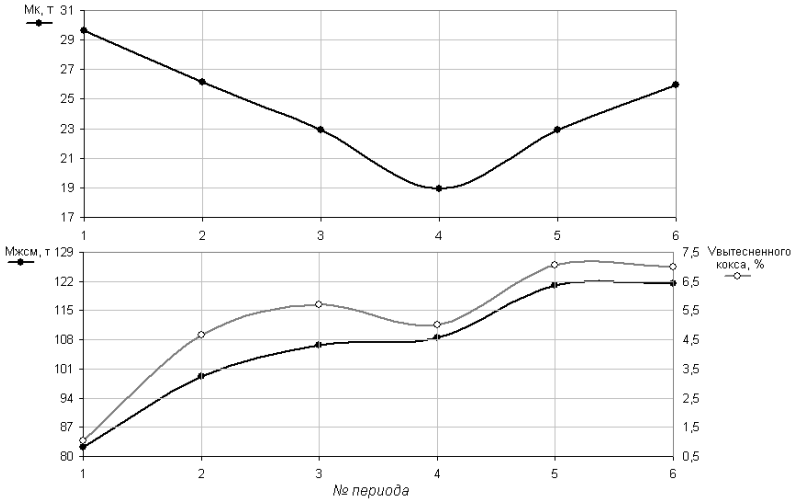


Рис.5. Изменение массы кокса, массы выгруженных на него железосодержащих материалов и объема вытесненного кокса

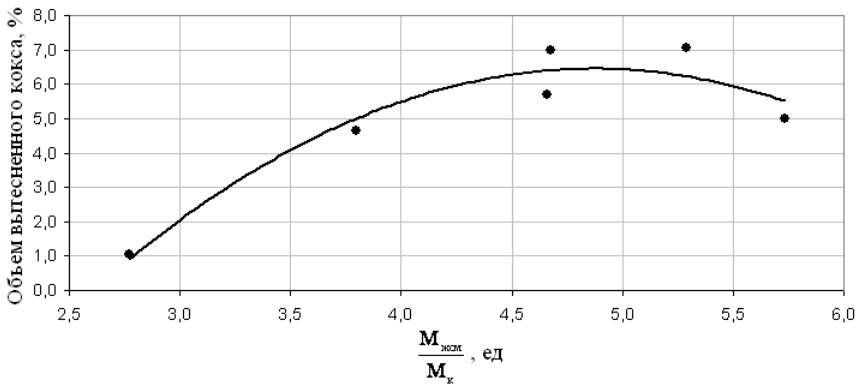


Рис.6. Зависимость вытесненного кокса от отношения масс железосодержащих материалов и кокса



**Заключение.** С помощью системы измерения профиля поверхности засыпи шихты разработан метод определения объема вытесненного кокса при выгрузке на него железосодержащих компонентов шихты. Объем вытесненного кокса определяется конфигурацией, сформированной в результате выгрузки порций шихты, поверхности засыпи и углов ее откоса. Использование разработанного метода для исследуемых вариантов работы печи с использованием измерений радиолокационным профилемером слоев шихтовых материалов показало, что объем вытесненного кокса определяется, как массой выгружаемых на него железосодержащих материалов, так и зависит от массы выгруженного кокса. Это свидетельствует о влиянии соотношения толщин слоев железорудных материалов и кокса на объем вытесненного кокса, которое описано математической зависимостью. Разработанный метод определения объема вытесненного кокса при выгрузке на него железосодержащих компонентов шихты может быть использован в составе математической модели радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, а также в составе информационной системы расчета и отображения информации, полученной с помощью радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи.

1. *Большаков В.И., Вишняков В.И.* Оценка перераспределения слоя кокса после выгрузки на него рудной порции // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. научн. тр. ИЧМ. – 2007. – Вып. 14. – С.60–73.
2. *Application of simulation model for burden distribution to actual operations / Y.Kajiwara, T.Jimbo, A.Kometani and others* // Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan, 1984. – №5. – P.378–386.
3. *Развитие математической модели распределения под действием нагрузки с разрушением слоя кокса / Е.Камисака, Т.Окуно, Т.Ирита и др.* // Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan. – 1984. – №24. – P.327.
4. *Влияние явления обрушения слоя кокса на распределение шихты на колошнике доменной печи / Е.Окуно, К.Кунитомо, Т.Ирита и др.* // Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan. – 1986. – Т.72. – №7. – С.75–82.
5. *Development of Mathematical Model to Estimate Burden Distribution in Bell-less Charging for Blast Furnace / Y.Okuno, S.Matsuzaki, K.Kunitomo and others* // Tetsu to hagane, Journal of The Iron and Steel Institute of Japan. – 1987. – Т. 73. – №1. – P.91–98.
6. *Стефанович М.А.* Анализ хода доменного процесса. – Свердловск: Металлургия, 1960. – 286 с.
7. *Клемперт В.М., Френкель М.М., Гришкова А.А.* Контроль и управление газораспределением доменной печи. – М.: Металлургия, 1993. – 142 с.

*Статья рекомендована к печати:  
 Ответственный редактор  
 раздела «Доменное производство»:  
 академик НАН Украины В.И.Большаков  
 докт.техн.наук, проф. И.Г.Товаровский*

*І.Г.Муравьева, Ю.С.Семенов, Ф.М.Шутилев, Є.І.Шумельчик, С.Т.Шул'ко, Ю.О.Богачов*

**Метод визначення об'єму коксу, що витісняється, при вивантаженні на нього залізовмісних компонентів шихти**

Метою дослідження є розробка методу визначення об'єму коксу, що витісняється при вивантаженні на нього залізовмісних компонентів шихти у доменній печі. Встановлено, що об'єм коксу, ЩО ВИТІСНЯЄТЬСЯ, визначається, як масою вивантажуваних на нього залізовмісних матеріалів так і масою вивантаженого коксу. Показано, що розроблений метод може бути використано у складі інформаційної системи розрахунку і відображення інформації щодо рівня засипу, одержаної за допомогою радіолокації вимірювача профілю, та у складі математичної моделі радіального розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі.