

УДК 669.162.2:662.74.003.12

В.И. Большаков, В.И. Вишняков**ОЦЕНКА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛОЯ КОКСА ПОСЛЕ
ВЫГРУЗКИ НА НЕГО РУДНОЙ ПОРЦИИ**

Выполнен анализ деформации слоя кокса под слоем железорудных материалов перед пуском доменных печей. Рассчитаны объемы деформированного слоя кокса. Показано распределение рудных нагрузок без учета и с учетом деформации слоя кокса.

Введение. Совершенствование приемов управления распределением шихтовых материалов на колошнике доменной печи и полное использование технологических возможностей системы загрузки является основой повышения эффективности работы доменных печей [1]. Для обоснованного управления формированием порций и распределением загружаемых на колошник материалов необходимо знать фактическое распределение шихтовых материалов на поверхности засыпи доменной печи. Распределение материалов определяется программой загрузки, однако на реальное распределение шихты могут оказывать существенное влияние профиль поверхности засыпи, деформация слоев кокса воздействием газового потока. Данные об изменении распределения кокса по радиусу печи под воздействием загружаемой на слой кокса порции железосодержащих материалов могут быть получены во время предпусковых исследований распределения материалов на колошнике доменной печи (ДП) при ее загрузке перед задувкой после строительства или капитального ремонта [2].

Постановка задачи. Процесс деформации слоя кокса под слоем железорудных материалов на колошнике доменной печи мало изучен. На перераспределение кокса под слоем железосодержащих материалов существенно влияют тип загрузочного устройства и программа загрузки. В доменных печах, оборудованных конусными загрузочными устройствами (КЗУ), осуществляется интенсивная загрузка узким кольцом шихты по всему периметру большого конуса [3] при этом ширина основного потока загружаемых материалов обычно не превышает 300 мм. При загрузке шихтовых материалов, особенно в случаях изредка применяемой отдельной подачи рудных и коксовых порций, происходит смещение кокса по радиусу печи из-за интенсивной выгрузки железосодержащих материалов. На ДП оборудованных КЗУ отдельная или расщепленная подача применяется в редких случаях, в основном печь работает на прямых или на обратных смешанных подачах. Исследования деформации кокса на печах, оснащенных КЗУ, практически не велись, на это указывает малое число публикаций. По данным работы [4] значительного изменения количественного распределения кокса по радиусу под дейст-

вием силы ударов железорудных материалов, при изменениях уровня засыпи и скорости выгрузки, во время конусной загрузки не обнаружено.

Проводились исследования по распределению материалов на колошнике перед задувкой печи, и только некоторые авторы упоминают о возможном смещении части кокса рудой к центру печи [5, с.61]. Так, например, в работе [6] не упоминается о смещении кокса под воздействием руды, но приводится рисунок, характеризующий распределение материалов на колошнике ДП объемом 2000 м^3 Новолипецкого металлургического завода перед задувкой. Анализ этих данных с позиций перераспределения кокса под действием руды показывает, что рудная порция №1 при загрузке на колошник воздействовала на кокс предыдущей порции и сместила его к центру печи. При этом угол откоса кокса под слоем руды составил 16° , а на свободной от руды поверхности кокса угол откоса кокса изменяется от 38° до 25° в осевой зоне печи. Поверхность следующего слоя кокса порции №2 расположилась V-образно под углом $\sim 28^\circ$.

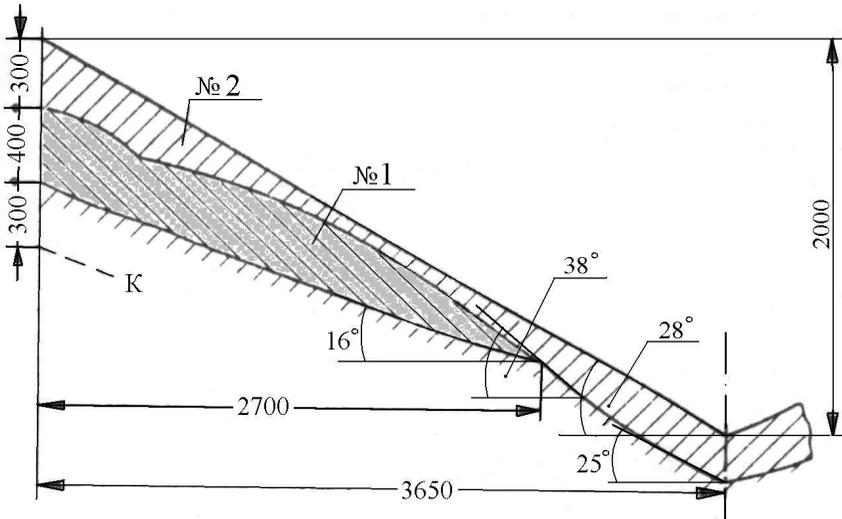


Рис.1. Распределение материалов на колошнике доменной печи перед задувкой оснащенной конусным ЗУ. Уровень засыпи – 2,5 м; глубина воронки – 2,0 м; К – кокс; подача №1 – $\text{РА}_2\downarrow$, 24 т; подача №2 – $\text{К}_2\downarrow$, 8 т.

В лотковых бесконусных загрузочных устройствах (БЗУ), ширина потока загружаемых материалов на колошнике больше, чем у КЗУ, но обычно, не превышает 1300 мм. Расход шихтовых материалов с лотка БЗУ для кокса $0,5\text{--}0,32\text{ м}^3/\text{с}$, а для железорудных материалов $0,5\text{--}0,25\text{ м}^3/\text{с}$. Время истечения материалов из бункеров 70–120 с [2], т.е. время выгрузки порции на колошник в 5–6 раз больше, а интенсивность потока и его динамическое воздействие

многократно меньше. В процессе загрузки железосодержащих материалов на наклонную поверхность кокса, его слой деформируется, и часть кокса смещается к центру печи, вместе с коксом перемещается и железорудные материалы [4].

Изложение основных материалов исследования. Сотрудниками ИЧМ выполнены исследования деформации исходного слоя кокса после выгрузки на него рудных материалов в доменных печах №5 (объемом 5580 м³) ОАО «Северсталь» в 1996г. [7, 8] и №9 (объемом 5000 м³) КГГМК «Криворожсталь» в 2003г. [9], оснащенных бесконусными загрузочными устройствами лоткового типа с загрузкой шихтовых материалов при изменении угловых положении лотка от стенки к оси. На ДП №5 ОАО «Северсталь» после выгрузки порции №2 – 30т кокса из бункера Б2 по угловым положениям распределителя 8–4 в печи измерялся профиль засыпи кокса по двум взаимно перпендикулярным диаметрам колошника. Затем выгружались порция №3 – 120т железосодержащих материалов (агломерат + окатыши) из бункера Б1 по угловым положениям 9–4 и аналогично выполнялись замеры профиля засыпи железосодержащих материалов. По результатам измерений построены профили поверхности засыпи каждой порции по двум диаметрам колошника. Выполнена оценка влияния смещения кокса после выгрузки на него порции железосодержащих материалов на радиальное распределение. Измерение толщины слоя железосодержащих материалов порции №3 производилась зондированием слоя с помощью металлического щупа в шести точках по одному радиусу колошника со стороны газоотвода ГО–7. Результаты измерений представлены в табл.1 и на рис.2.

Анализ результатов измерений, приведенных в табл.1, показал, что при загрузке порции железосодержащих на кокс происходит деформация наклонной поверхности кокса. При этом уменьшается толщина слоя кокса на наклонной поверхности с углами откоса, близкими к углу внутреннего трения кокса – 35⁰–38⁰, на расстоянии 1,75–3,5 м от оси печи. Часть кокса сползает по образующей центральной воронки и накапливается в осевой части печи, частично перемешиваясь с железосодержащим материалом выгруженной порции. Наибольшее уменьшение толщины слоя кокса – на 0,24 м произошло на расстоянии 2,5 м от стенки печи. Толщина слоя на оси печи увеличилась на 0,42 м, радиус поверхности увеличенной толщины слоя составил 1,5 м от оси печи. По результатам измерений и анализа построена поверхность слоя кокса порции №2 после деформации (на рис.2 показана пунктирной линией).

Оценка погрешности результатов измерений показала, что она составляет около 10%, т.к. толщина деформируемого слоя не более 0,5м, а шаг изменения толщины (высоты) слоя с учетом крупности фракций материала не менее 0,05м.

Таблица 1. Перераспределение кокса, изменение его углов откоса и распределение рудной нагрузки по равновели-
ким зонам ДШ №5 1996г. ОАО «Северсталь»

	Равновеликие зоны колошника														
	1			2		3			4	5	6	7	8	9	10
	1,1	1,2	1,3	1,4	2,1	2,2	3,1	3,2							
Кол-во кокса после его загрузки, м ³	1,9	1,8	1,7	1,7	3,5	3,6	3,7	3,9	7,3	7,0	7,0	5,8	5,1	5,3	5,7
Углы откоса кокса после его загрузки, град	14	39	39	37	37	37	37	37	21	23	1	-15	-20	-8	-2
Кол-во кокса после выгрузки рудной порции, м ³	2,8	2,5	2,0	1,8	3,2	3,0	2,9	2,9	6,3	7,0	7,0	6,1	5,7	5,9	5,9
Углы откоса кокса после выгрузки рудной порции, град	12	13	18	25	30	29	33	35	41	20	4	-10	-16	-13	-11
Разница, м ³	+1,0	+0,7	+0,3	0,0	-0,3	-0,6	-0,9	-1,0	-0,9	0,0	0,0	+0,3	+0,6	+0,6	+0,2
Рудная нагрузка без учета сдвига кокса, т/т	4,7	5,1	4,5	4,0	3,4	2,7	2,2	1,8	2,4	3,1	3,5	5,0	6,5	6,4	5,5
Рудная нагрузка с учетом сдвига кокса, т/т	1,1	2,1	3,1	3,9	4,3	4,5	4,6	4,4	3,6	3,0	3,5	4,5	5,2	5,2	5,1

В табл.1 знаком «+» выделены зоны, в которых количество кокса увеличилось, а знаком «-» выделены зоны, в которых количество кокса после выгрузки уменьшилось.

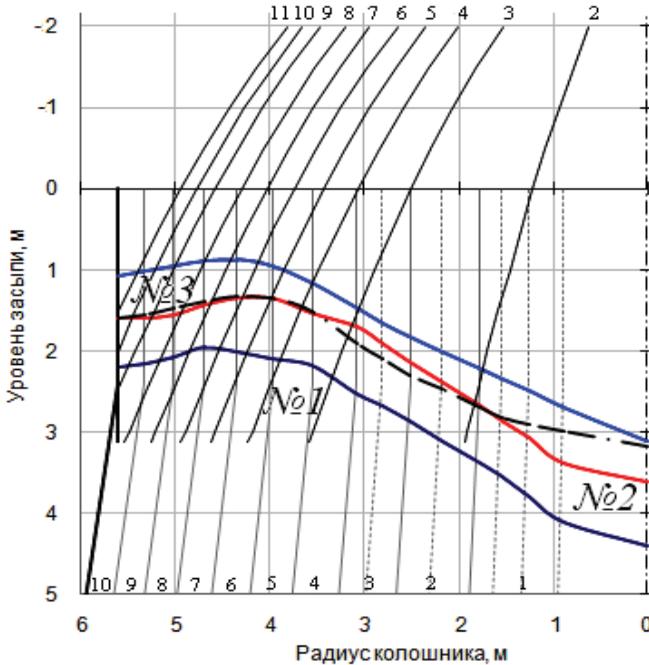


Рис.2. Профили поверхности засыпи шихтовых материалов на колошнике ДП-5 после выгрузки порций №№ 1–3. Программы загрузки порций: №1 АР 8–4 120т Б1; №2 К 8–4 30т Б2; №3 АО 9–4 120т Б1. №2 – номер порции, К – вид материала (К – кокс, А – агломерат, О – окатыши, Р – руда), 8–4 – угловые положения распределителя, 30т – масса выгружаемого материала, Б2 – номер бункера из которого производилась выгрузка. 10–1 – равные по площади кольцевые зоны колошника. 11–2 – траектории угловых положений лоткового распределителя. Пунктиром показан профиль деформированной поверхности кокса порции №2 после выгрузки рудных материалов порции №3.

Зная толщину коксового и железосодержащего слоев, определили рудную нагрузку без учета и с учетом деформации кокса. При объеме загруженного кокса $V_k=60\text{м}^3$, расчетный объем перемещенного по радиусу печи кокса составили $7,4\text{м}^3$, т.е. 12%. Результаты расчета приведены в табл.1 и на рис.3. С учетом результатов расчета при средней рудной нагрузке 4,0 т/т оценили изменение рудных нагрузок в равновеликих зонах колошника. Распределение рудных нагрузок (РН) по радиусу колошника ДП №5 показывает, что при деформации кокса по поверхности засыпи (12%) их распределение с учетом смещения кокса ощутимо отличаются от РН без учета смещения кокса в осевой и промежуточной зонах.

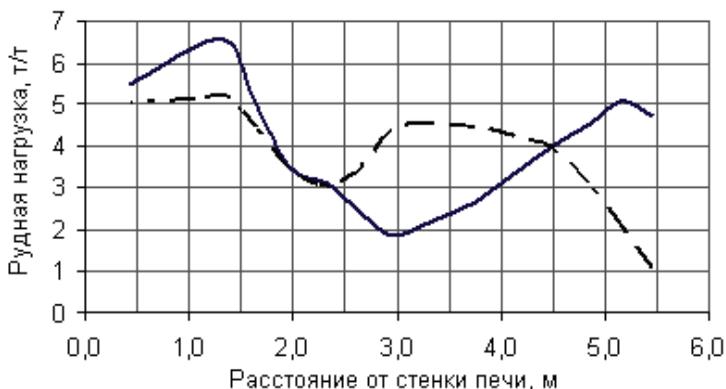


Рис.3. Распределение рудных нагрузок по радиусу колошника ДП №5.
 ————— без учета деформации кокса; — — — — с учетом деформации кокса;

На ДП №9 КГГМК «Криворожсталь» при загрузке печи после капремонта I-го разряда, выполненного в 2003г., измерение толщины слоя железорудных материалов проводились после выгрузки на слой кокса (порция №1) рудной порции (порция №2). Во время экспериментальных исследований при загрузке шихтовых материалов в ДП №9 после капремонта продолжалась наладка новой системы управления механизмами шихтоподачи и загрузочного устройства. Поэтому при выгрузке в печь кокса массой 32т (порция №1) из Б1 на угловые положения лотка 8...4, вследствие несанкционированной его остановки в процессе выгрузки, часть порции массой $\approx 10-12,5$ т выгрузилась под Б1 (из 5...4 позиций лотка в сектор печи 210^0-300^0), что привело к перекосу уровня засыпи (на $0,8 \div 1,5$ м в сторону понижения его под Б2 в секторе печи $0^0-90^0-180^0$) (рис.4). После выгрузки порции № 1 – кокса из бункера Б1, определялись исходные профили поверхности засыпи кокса по двум взаимно перпендикулярным диаметрам колошника Б1(270^0) – Б2(90^0) и ШП(180^0) – ПУ(0^0).

Затем выгружалась порция железосодержащих материалов (агломерат + руда + шлак + окатыши) общей массой 99т из бункера Б2 и производились замеры для определения профиля засыпи железосодержащих материалов по одному диаметру на оси бункеров БЗУ (Б1–Б2). Одновременно измерялась толщина слоя железосодержащих материалов порции №2 путем вертикального зондирования слоя по тому же диаметру колошника с помощью электромеханического щупа специальной конструкции, разработанной в ИЧМ. Результаты измерений представлены в табл.2 и на рис.5. Установлено, что при загрузке порции железосодержащих материалов на слой кокса происходит перераспределение его по поверхности засыпи.

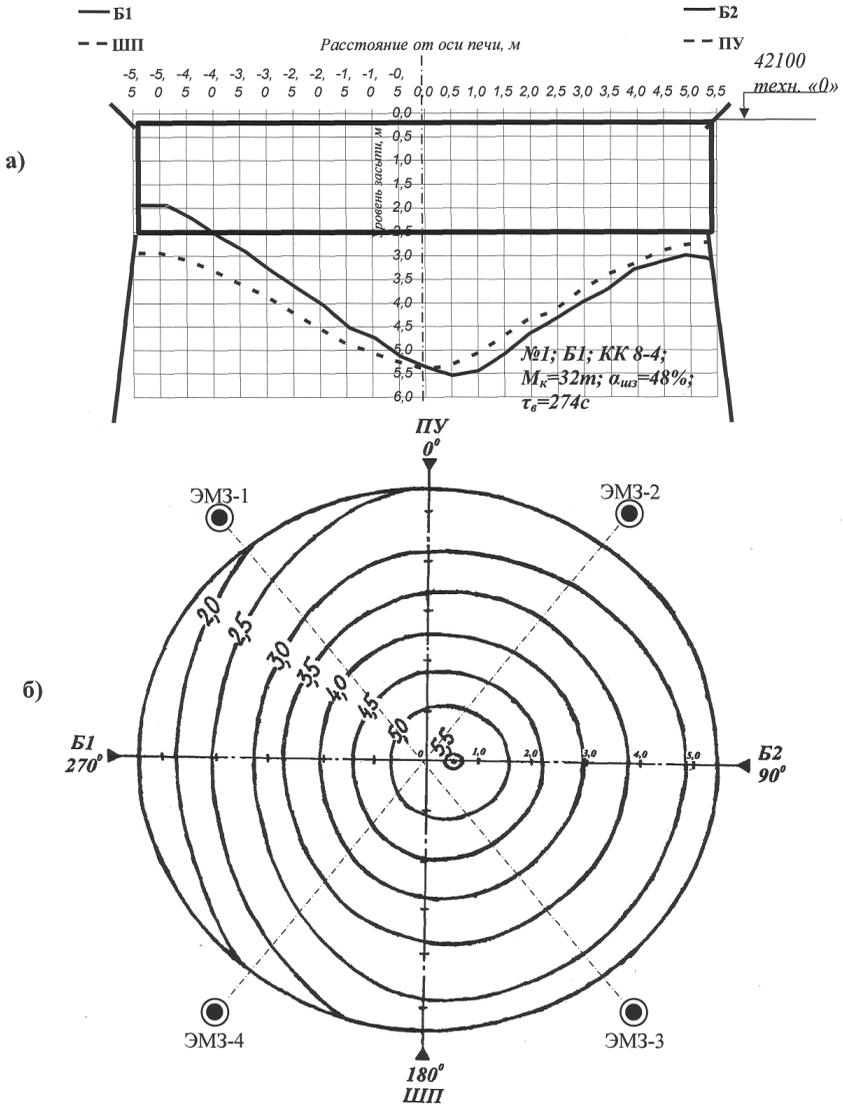


Рис.4. Профиль поверхности засыпи на колошнике ДПЛ№9 после выгрузки порции кокса: а) вертикальные сечения Б1–Б2 и шихтоподача (ШП)–пылеуловитель (ПУ); б) горизонтальный разрез (числовые значения рядом с линиями – уровень засыпи, м от технологического нуля).

При этом из-за деформации части слоя кокса, уменьшается его толщина на наклонной поверхности обоих радиусов в равновеликих кольцевых зонах 2 и 1 с углами откоса, близкими к углу внутреннего трения кокса – 35° на отрезке $1,0 \div 2,5$ м. Смещаемый кокс преимущественно сползает по образующим воронки и накапливается вблизи осевой зоны печи, частично перемешиваясь с железосодержащим материалом выгруженной порции №2. По результатам измерений построена поверхность слоя кокса порции №1 после выгрузки на нее порции №2 (показана пунктирной линией).

Результаты исследования. Анализ результатов измерений показал, что после необычной выгрузки порции кокса №1 разница уровня засыпи по диаметру Б1–Б2 составила 1,08 м, а смещение нижней точки воронки по радиусу относительно оси печи составило $\sim 0,7$ м. После выгрузки порции №2 это смещение еще увеличилось до 0,9 м. Различным оказалось и смещение кокса по разным откосам профиля (рис.5). На более пологом скате со стороны бункера Б2 небольшая деформация (уменьшение толщины слоя кокса) произошла на участке радиуса 2,0–3,0 м от оси печи. Утолщение коксового слоя в осевой зоне имеет радиус 2 м, и толщину 0,32–0,26 м. Со стороны бункера Б1 зона утолщения слоя кокса расположена на расстоянии от 3 м до 4,2 м от оси печи, а подушка кокса распространяется от оси до радиуса в 2,6 м. Т.е. структура изменения толщины слоя кокса на разных откосах разная. Следует заметить, что и в периферийной зоне на обоих радиусах наблюдается некоторая деформация (уменьшение толщины) слоя кокса на расстоянии ~ 1 м от стенки печи. При объеме загруженного кокса 64 м^3 , расчетные объемы перераспределенного на колошнике печи кокса составили: – по диаметру печи $8,5 \text{ м}^3$, т.е. 13,2%. Фактически на колошнике ДП №9 располагаются два профиля засыпи, профиль со стороны Б1 радиусом 6,3 м, а со стороны Б2 – 4,5 м. Распределение рудных нагрузок по двум радиусам печи представлено на рис. 6, 7 и табл.3, 4.

При средней РН 3,1 т/т распределение рудных нагрузок до и после деформации слоя кокса по двум радиусам печи по характеру распределения похожи на распределение РН ДП №5 ОАО «Северсталь».

Считается, что при выполнении условия $\text{tg}\theta \leq \text{tg}\varphi$, когда θ – угол наклонной поверхности кокса меньше, чем φ – угол внутреннего трения кокса, слой кокса остается устойчивым [4]. При $\text{tg}\theta > \text{tg}\varphi$ происходит смещение кокса по радиусу печи, это происходит после выгрузки на наклонную поверхность слоя кокса железорудных материалов, которые своим весом вызывают деформацию слоев кокса. Смещение слоя кокса представляет собой явление перемещения под углом, соответствующим углу внутреннего трения, к центру печи.

Таблица 2. Величина перемещенного кокса и изменение его углов откоса (числитель – после выгрузки, знаменатель – под слоем железорудных материалов) по равновеликим зонам колошника ДП №9 «Криворожсталь»

	Равновеликие зоны колошника														
	1		2		3		4	5	6	7	8	9	10		
	1,1	1,2	1,3	1,4	2,1	2,2								3,1	3,2
Ось – Б1, м ³	0,24	0,26	0,31	0,38	0,68	0,29	0,02	-0,02	0,14	0,29	0,05	-0,16	-0,55	-0,8	-0,48
Ось – Б2, м ³	0,31	0,34	0,33	0,24	-0,02	-0,33	-0,24	-0,00	0,29	-0,11	-0,38	-0,24	-0,42	-0,48	-0,18
Среднее, м ³	0,66	0,6	0,64	0,63	0,69	-0,03	-0,22	-0,02	0,43	0,18	-0,33	-0,42	-1,01	-1,27	-0,52
Ось – Б1, град.*	31	26	27	41	49	49	16	29	40	34	36	36	30	4	4
	36	29	36	49	40	26	12	25	47	30	29	32	7	10	18
Ось – Б2, град.*	-10	33	35	39	40	31	32	35	32	42	18	17	22	4	-15
	1	32	36	9	14	29	43	51	32	24	24	20	5	6	0
Среднее, град.*	12	30	31	40	45	41	24	32	36	38	29	28	27	0	-10
	20	30	36	33	28	28	29	40	40	27	27	27	6	8	9

* – Углы откоса профиля по отношению к горизонтالي положительные, если откос направлен в сторону оси печи. Если участок профиля наклонен к периферии, то значения указаны со знаком минус (-).

Таблица 3. Распределение рудных нагрузок по меньшему радиусу воронки профиля засыпи на ДП №9.

Расстояние от стенки печи по радиусу Б2, м	4,50	4,22	3,93	3,62	3,28	2,92	2,52	2,06	1,80	1,51	1,19	0,81	0,58	0,31
РН по меньшему радиусу воронки профиля (Б2), т/т. Без учета сдвига.	5,50	5,92	5,40	3,84	2,69	2,79	3,24	3,32	2,40	2,07	2,88	3,05	2,87	4,23
РН по меньшему радиусу воронки профиля (Б2), т/т. С учетом сдвига.	1,88	2,16	2,59	4,08	5,78	4,92	3,21	2,41	2,76	3,50	3,81	4,88	5,20	5,10

Таблица 4. Распределение рудных нагрузок по большому радиусу воронки профиля засыпи на ДП №9.

Расстояние от стенки печи по радиусу Б1, м	6,30	6,02	5,73	5,42	5,08	4,72	4,32	3,86	3,60	3,31	2,99	2,61	2,38	2,11	1,75	1,40	0,90	0,40
РН по большому радиусу воронки профиля (Б1), т/т. Без учета сдвига.	3,97	4,90	5,74	5,89	5,77	5,71	5,33	4,58	3,65	3,35	3,35	3,10	2,79	2,42	1,98	1,55	1,37	2,05
РН по большому радиусу воронки профиля (Б1) по двум слоям, т/т. С учетом сдвига.	1,36	2,74	3,76	3,44	3,26	2,88	2,20	1,91	2,42	3,24	3,48	2,76	2,19	2,32	2,35	2,92	3,54	3,31

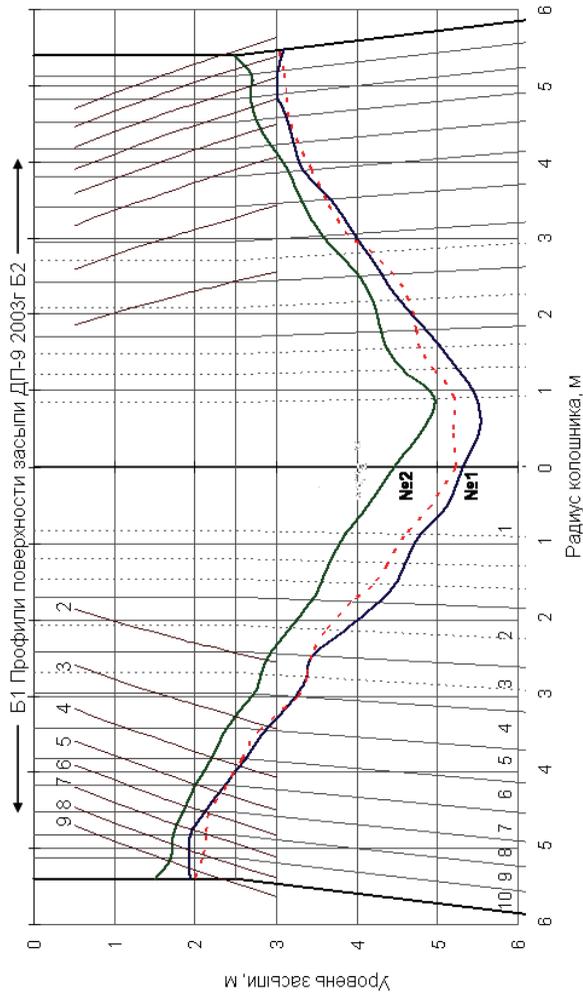


Рис.5. Профили поверхности засыпки шихтовых материалов на колошнике ДП-9 после выгрузки порций №1 и №2. Программы загрузки: №1 К 8-4 32т Б1; №2 А+О+Р+Ш 9-4 99т Б2;

№1 – номер порции, К – вид материала (К – кокс, А – агломерат, О – окатыши, Р – руда, Ш – шлак), 8-4 – угловые положения распределителя, 32т – масса выгружаемого материала, Б1 – номер бункера из которого производилась выгрузка; пунктиром обозначен профиль кокса после его смещения. 10-1 – равные по площади кольцевые колошника. 9-2 – траектории угловых положений лоткового распределителя.

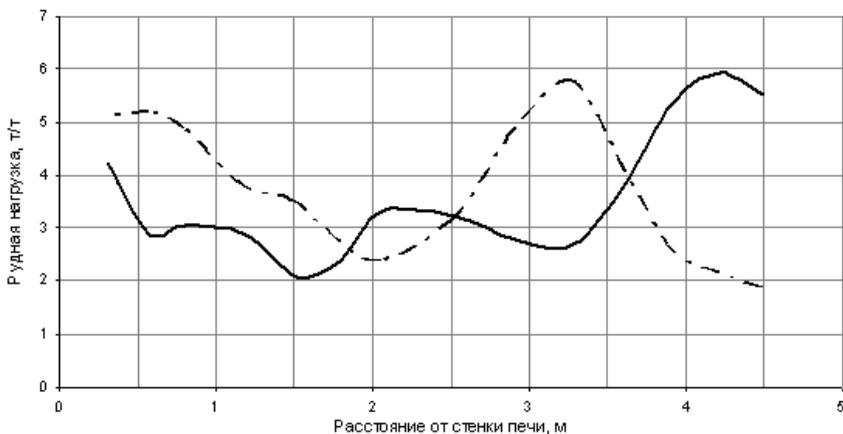


Рис.6. Распределение рудных нагрузок по меньшему радиусу воронки профиля засыпи на ДП №9 (радиус воронки – 4,5м).

— — — — без учета деформации кокса; — — — — с учетом деформации кокса.

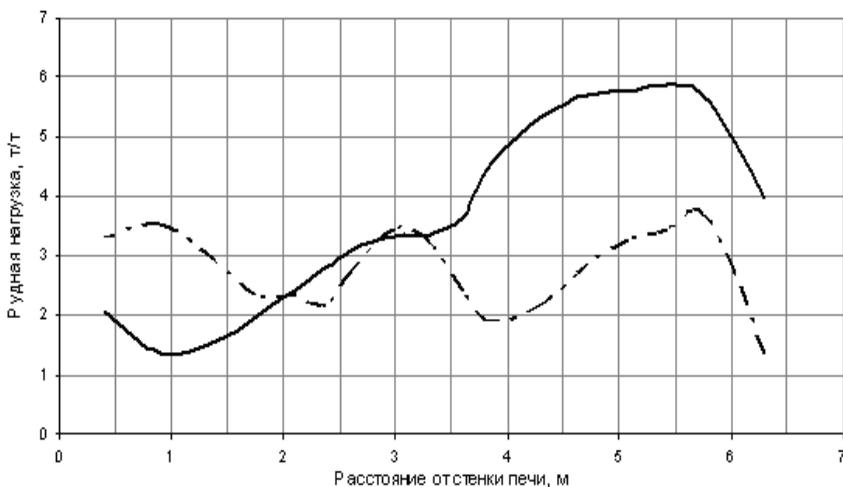


Рис.7. Распределение рудных нагрузок по большему радиусу воронки профиля засыпи на ДП №9 (радиус воронки – 6,3м).

— — — — без учета деформации кокса; — — — — с учетом деформации кокса.

Возникновение смещения кокса зависит в большей степени от соотношения силы давления насыпаемых на поверхность слоя кокса железорудных материалов и сопротивления слоя кокса, чем от энергии удара железорудных [4]. Анализ распределения РН по радиусу колошника ДП-9

подтверждает, что при перераспределении кокса по поверхности засыпи, РН с учетом смещения отличаются от распределения РН без такого учета, увеличивается объем кокса в осевой зоне, а также выполаживается гребень материалов на поверхности засыпи.

При загрузке железосодержащих материалов на слой кокса на его поверхности происходит перераспределение. При этом наклон поверхности слоя кокса понижается до угла, почти соответствующего углу внутреннего трения кокса [4, 10]. Масштабы смещения зависят от конфигурации исходной поверхности кокса, а количество смещенного кокса изменяется в диапазоне 12–13% от общего количества загруженного кокса. Возникновение смещения на печах, оснащенных БЗУ, больше зависит от исходного профиля и давления железорудных материалов, насыпанных на поверхность кокса, чем от энергии удара засыпаемых материалов. На действующей печи положение поверхности кокса под слоем железорудных материалов мало изучено и зависит от распределения по радиусу печи скорости опускания шихты и распределения газового потока. Углы откоса поверхности материалов несколько меньше, чем на остановленной [11]. Однако результаты исследований смещения слоя кокса под слоем железорудных материалов позволяют предположить, что деформация слоя кокса при выгрузке последующей порции железосодержащих материалов имеет место и на работающей печи.

Выводы:

Анализ результатов исследования перераспределения кокса под слоем железорудных материалов на поверхности засыпи в доменной печи во время загрузки перед задувкой показал, что из-за смещения части кокса по наклонной поверхности осевой воронки, толщина коксового слоя здесь уменьшается, а перемещаемый кокс накапливается вблизи осевой зоны печи, частично перемешиваясь с железосодержащими материалами, за счет чего увеличивается размеры и газопроницаемость осевой отдушины. Знание изменений толщин слоев кокса и железосодержащего материала после выгрузки в печь последнего необходимы для расчета распределения рудных нагрузок по радиусу колошника.

1. *Большаков В.И.* Теория и практика загрузки доменных печей. // М.: Металлургия, – 1990. –256с.
2. *Освоение системы загрузки современной доменной печи / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, Н.Г. Иванча и др. // Обзор инф.. Ин-т Черметинформация. М, – 1989. – 53с.*
3. *Большаков В.И., Порубова Т.П., Вишняков В.И.* Управление распределением шихты в доменных печах // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Выпуск №6. К.: «Наукова думка». – С.61–73
4. *Влияние явления обрушения слоя кокса на распределение шихты на колошнике доменной печи / Е. Окуно, К. Кумимото, Т. Ирита и др. // Тэцу то хаганэ, – 1986. – №7. – С.75–82.*

5. *Грузинов В.К.* Управление газовым потоком в доменной печи программной загрузкой. // Свердловск, – 1960. –215с.
6. *Опыт работы мощной доменной печи с двумя чугунными летками / А.П. Лихорадов, Н.П. Норик, Г.Г. Лукашев и др. / Сталь, – 1969. – №4.*
7. *Исследование распределения шихты и газового потока в доменной печи большого объема при использовании БЗУ / В.И. Большаков, С.Т. Шулико, В.В. Канаев и др. // Metallurg, – 1997. – №12. – С.16–17.*
8. *Распределение шихты и газового потока в доменной печи большого объема / В.И. Большаков, И.Е. Варивода, С.Т. Шулико и др. // Труды I Международной научно–технической конференции «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства». – Череповец: ЧГУ, 1998. – С.15–18.*
9. *Исследование распределения шихтовых материалов в доменной печи №9 КГГМК «Криворожсталь» / В.И. Вишняков, Е.А.Белошапка, В.В.Лебедь и др.// Международная научно–техническая конференция молодых специалистов «Азовсталь–2004», – С. 8–9*
10. *Терцаги К.* Теория механики грунтов. –М.: Госстройиздат, 1961. –507с.
11. *Определение углов откоса шихтовых материалов на поверхности засыпи в доменной печи / И.Г.Муравьева, С.Т.Шулико, Ю.С.Семенов и др.// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Выпуск №14. К.: «Наукова думка». – С.40-49.*

Статья рекомендована к печати канд.техн.наук И.Г.Муравьевой