

И.Г.Муравьева, С.Т.Шулико, Ю.С.Семенов, Е.И.Шумельчик

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ ОТКОСА ПОВЕРХНОСТИ ЗАСЫПИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Приведены результаты исследований изменения углов откоса шихтовых материалов, полученных с помощью радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи шихты. Определены граничные величины углов откоса, которые могут быть использованы в качестве исходных данных для математической модели радиального распределения шихтовых материалов.

Цель работы. Целью исследований являлось определение значений углов откоса шихтовых материалов, образованных на поверхности засыпи после выгрузки порций шихты в печь, для последующего их задания в математическую модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, разработанную в ИЧМ. Модель предназначена для аналитического исследования формирования слоев шихтовых материалов после выгрузки на поверхность засыпи и расчета параметров их распределения (массы и объемов железорудных материалов и кокса, рудной нагрузки) по сечению колошника печи [1].

Методика исследования. Для программ загрузки, используемых на ДП №5 ОАО «Северсталь», оборудованной бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) с лотковым распределителем шихты фирмы «Paul Wurth», представляющих собой загрузку последовательно чередующихся порций кокса и смеси агломерата с окатышами (двухстрочная программа загрузки), с помощью модели радиального распределения были рассчитаны показатели радиального распределения шихтовых материалов, в частности рудные нагрузки, взаимосвязь которых с объемной долей CO_2 в газе по радиусу печи характеризовалась высокими значениями коэффициента корреляции ($r_{xy}=0,92$). При этом, в модель радиального распределения в качестве исходных были заданы фактические углы откоса шихтовых материалов к оси и стенке печи измеренные с помощью четырех электрометрических уровнемеров, три из которых установлены в периферийной зоне колошника, и один уровнемер, измеряющий уровень засыпи в осевой зоне печи. На ДП №9 ОАО «Арселор Миттал Кривой Рог», оснащенной БЗУ фирмы «Paul Wurth», загрузка шихты в которую осуществляется по программе, включающей полуцикл загрузки, состоящий из девяти–десяти последовательно загружаемых порций кокса, в числе которых две порции кокса выгружаются в осевую зону печи, и смеси железорудных материалов (агломерат, окатыши, отвалный обогащенный шлак). В отличие от ДП №5, где используется двухстрочная программа загрузки, процесс формирования слоев материалов и профиля поверхности засыпи после выгрузки каждой из десяти порций в значительной мере отличается. В ре-

зультате взаимосвязь рассчитанных с помощью математической модели для ДП№9 показателей радиального распределения материалов, в частности, рудной нагрузки, с объемной долей CO_2 в газе по радиусу печи имели более низкий коэффициент корреляции ($r_{xy}=0,7-0,8$), что в значительной мере обусловлено отсутствием достоверных исходных данных, в частности, углов наклона (откоса) профиля поверхности засыпи шихты на колошнике перед выгрузкой очередной порции материалов.

В математической модели процесс формирования слоев шихтовых материалов на колошнике определяется условием, согласно которому, при падении потока материалов с лоткового распределителя шихты образуется поверхность засыпи. Углы откоса склонов которой, по мере накопления шихтовых материалов увеличиваются линейно, и при достижении максимальных значений, материалы перераспределяются по поверхности засыпи [2].

Результаты исследования. Оснащение ДП№9 радиолокационной системой измерения профиля поверхности засыпи шихты в печи [3] обеспечило возможность определения углов откоса поверхности шихтовых материалов перед выгрузкой и после выгрузки каждой их порции в печь. Схема определения углов откоса показана на рис.1. Углы откоса были определены для трех периодов работы печи с различными программами загрузки шихты и показателей дутьевого режима (табл.1 и 2).

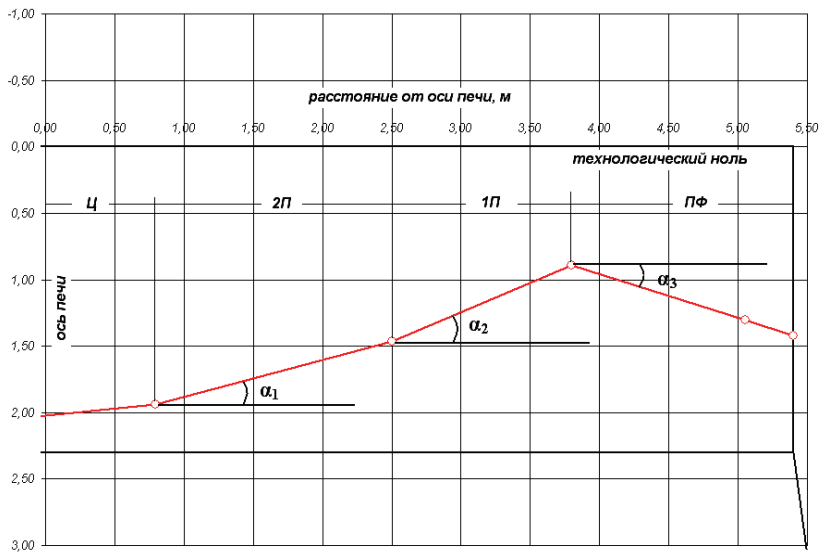


Рис.1. Схема определения углов откоса профиля поверхности засыпи шихты $\alpha_{1...3}$ на колошнике ДП№9. Кольцевые зоны сечения колошника печи: ПФ, 1П, 2П и Ц — периферийная, первая промежуточная, вторая промежуточная и центральная; α_1 и α_2 — углы откоса профиля поверхности засыпи к оси печи, α_3 — к стенке печи.

Таблица 1. Программы загрузки ДП №9 в анализируемые периоды ее работы 2004–2006 гг.

Период	Программа загрузки:										Уро- вень засы- пи, м	Кол-во циклов загруз- ки
	Шихтовые материалы: А – агломерат, О – окатыши, Ш ₀ – шлак отвальный обога- щенный, К – кокс; угловые позиции лотка БЗУ: 9...1											
	Номер порции материалов в цикле загрузки											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
I ¹⁾ (16.10.04 г.)	К 3– 1	АШ ₀ 9–6	К 8– 5	АО 9– 3	КО 3–1	КШ ₀ 8–4	АО 8– 4	К 8– 4	АО 9– 3	–	0,72	10
II ¹⁾ (24.06.05 г.)	К 3– 1	АШ ₀ 9–5	К 8– 4	АО 9– 3	К 4– 1	К 8– 4	АШ ₀ 9–4	К 7– 3	АО 9– 3	–	1,35	9
III ²⁾ (5.10.06 г., 6.10.06 г., 17.10.06 г., 26.10.06 г.)	К 8– 4	АОШ ₀ 9–3	К 8– 4	АОШ ₀ 9–3	КШ ₀ 2–1	К 8– 4	АОШ ₀ 9–3	К 8– 4	АОШ ₀ 9–3	КО 2–1	1,37	42

¹⁾ 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°, 1–22,0°;

²⁾ Углы наклона лотка БЗУ по позициям: 9–45,1°, 8–42,6°, 7–40,1°, 6–37,2°, 5–34,3°, 4–30,7°, 3–26,7°, 2–22,0°, 1–18,0°

Таблица 2. Параметры дутьевого режима ДП№9 в исследуемые периоды

Параметры	Периоды		
	I	II	III
Дутье:			
расход (Q_d), м ³ /мин	6905	6380	8371
температура (T_d), °C	1097	1067	1101,5
давление (P_d), ати	3,30	2,80	3,43
влажность, (W_d), г/м ³	н.д.	н.д.	21,4
доля кислорода (O_2), %	28,1	22,8	30,05
Расход природного газа ($Q_{пг}$), м ³ /мин	510	330	568
Колошниковый газ:			
давление ($P_{кол}$), ати	1,2	0,80	1,4
температура ($T_{кол}^{cp}$), °C	116	249	93
Температура газа на периферии ($T_{пф}^{cp}$), °C	308	495	227
Перепады давления:			
общий ($\Delta P_{общ}$), ати	2,03	1,94	1,95
верхний (ΔP_v), ати	0,48	0,47	0,45
нижний (ΔP_n), ати	1,56	1,48	1,5

В исследуемые периоды работы печи из совокупности определяемых для указанных кольцевых зон сечения колошника углов откоса поверхности засыпи перед и после выгрузки порции каждого вида шихтовых материалов, либо их смесей выделены максимальные и минимальные средние их значения за 8 часовой период работы печи. Из полученных значений углов откоса выбор граничных их величин, которые могут быть заданы в математическую модель распределения шихты, осуществлялся со следующими допущениями: в качестве граничных значений должны задаваться максимальные величины средних значений углов для всех видов загружаемых порций шихтовых материалов, при которых возможно обрушение (перемещение) материала по поверхности засыпи с последующим его перераспределением в кольцевых зонах сечения колошника.

С учетом особенностей программы загрузки шихты в ДП№9, в модель должны задаваться отдельно граничные углы откоса слоя кокса, после выгрузки его в периферийную и промежуточную зоны сечения колошника из угловых позиций лотка 8–4 (8–5), а также после выгрузки его в центральную зону из позиций 3–1. Значения граничных углов откоса поверхности засыпи при загрузке смесей железорудных шихтовых материалов определялись как максимальные значения средних их величин для всех выгружаемых порций за цикл загрузки. Например, для I–го и II–го периодов работы печи после выгрузки смеси агломерата с окатышами (АО) граничные значения углов откоса определялись как максимальные средних их значений для трех порций в цикле. Для III–VI периодов работы печи после выгрузки смеси железосодержащих материалов: агломе-

рат+окатыши+шлак отвалный обогащенный (АОШ_о) граничные величины углов откоса определялись как максимальные значения средних их величин для четырех повторяющихся аналогичных порций в цикле загрузки. Правомочность такого усреднения была подтверждена результатами анализа динамики изменения углов наклона профиля поверхности засыпи после выгрузки 4-ой и 9-ой порций АОШ_о, полученных в точках измерения уровня засыпи и приведенных к одному радиусу печи (рис.2). Из рис.2 следует, что характер изменения углов откоса в кольцевых зонах сечения колошника для указанных порций качественно, а в ряде случаев, и количественно не отличается друг от друга.

Для исследуемых периодов работы печи, получены граничные значения углов откоса после выгрузки порций шихты для кольцевых зон сечения колошника $\alpha_{1...3}$, которые приведены в табл.3. Для определения углов откоса материалов, которые должны задаваться в качестве исходных данных в математическую модель радиального распределения, приняты следующие допущения. Радиус колошника условно разбивается на три зоны, ограниченных точками, в которых производится измерение профиля поверхности засыпи. Затем определяется количество равновеликих зон, находящихся в пределах границ трех зон радиуса колошника. Формирование слоя материалов при выгрузке порций шихты в печь происходит с обрушением и перераспределением материалов по поверхности засыпи при достижении шихтовыми материалами граничных углов откоса. При этом в каждой из трех зон радиуса процессы обрушения и перераспределения происходят при соответствующих углах откоса материалов в каждой зоне.

Таблица 3. Граничные углы откоса шихтовых материалов исходного профиля поверхности засыпи перед выгрузкой порции $\bar{\alpha}$ и профиля после выгрузки материалов $\alpha \downarrow$

Период	Наименование порции	Углы откоса, град, $\alpha \downarrow (\bar{\alpha})$		
		α_3 (ПФ–IП)	α_2 (IП–II)	α_1 (2П–Ц)
16.10.04	1 – К 3–1	24,3 /22,5	17,3/10,9	11,6/14,2
	2 – А 9–6	23,4/23,6	28,6/8,8	12,4/10,6
	3 – К 8–5	31,8/21,1	35,4/23,5	14,4/7,4
	4 – АО 9–3	21,1/32,5	26,0/33,8	23,6/18,2
	5 – КО 3–1	24,5/21,7	28,2/9,1	20,3/12,5
	6 – КШ _о 8–4	33,8/24,8	14,4/28,4	6,4/21,0
	7 – АО 8–4	28,3/33,0	24,4/13,9	9,2/9,1
	8 – К 8–4	34,0/27,5	30,1/23,8	21,4/12,3
24.06.05	9 – АО 9–3	22,8/26,5	27,6/28,6	23,9/23,9
	1 – К 3–1	16,1/15,0	17,6/20,8	26,6/22,3
	2 – А 9–5	28,6/30,9	25,1/8,6	17,9/21,1
	3 – К 8–4	19,6/17,0	38,9/24,6	17,7/10,6

	4, 7 – АО 9–4	20,58/17,86	35,47/29,22	25,24/21,85
	5 – К 4–1	16,6/13,8	25,7/8,7	25,4/28,2
	6 – К 8–4	26,5/21,4	20,9/10,4	23,8/20,8
	8 – К 7–3	28,1/25,9	34,2/26,2	28,7/22,4
	9 – АО 9–3	18,2/15,1	33,9/32,3	28,7/31,4
5.10.06	1 – К 8–4	19,6/9,4	15,2/26,6	7,6/2,9
	2, 4, 7, 9 – АОШ ₀ 9–3	20,6/23,1	27,6/27,9	22,6/23,3
	3, 8 – К 8–4	22,9/16,9	29,0/21,4	22,1/18,2
	5 – КШ ₀ 2–1	11,2/8,0	15,9/11,8	9,3/7,0
	6 – К 8–4	19,7/11,2	13,0/21,3	8,6/10,6
	10 – КО 2–1	11,6/9,5	12,5/14,3	9,4/6,7
6.10.06	1 – К 8–4	20,9/13,7	13,2/24,8	11,4/15,6
	2, 4, 7, 9 – АОШ ₀ 9–3	20,4/25,1	25,3/24,9	22,3/22,8
	3, 8 – К 8–4	23,2/17,9	25,1/17,7	21,0/16,6
	5 – КШ ₀ 2–1	9,3/11,3	14,8/24,3	9,8/7,8
	6 – К 8–4	23,3/14,8	8,5/16,5	9,6/10,2
	10 – КО 2–1	8,4/10,9	10,8/24,5	9,4/9,2
17.10.06	1 – К 8–4	34,4/27,1	21,9/11,8	7,2/9,7
	2, 4, 7, 9 – АОШ ₀ 9–3	31,7/35,8	35,2/41,0	16,7/20,5
	3, 8 – К 8–4	33,2/28,0	39,6/32,1	16,1/12,3
	5 – КШ ₀ 2–1	24,6/20,9	19,1/36,8	7,4/11,9
	6 – К 8–4	33,4/26,4	21,9/12,9	8,3/5,0
	10 – КО 2–1	25,4/20,1	17,1/9,0	8,7/11,9
26.10.06	1 – К 8–4	16,7/7,8	9,6/28,0	11,0/19,8
	2, 4, 7, 9 – АОШ ₀ 9–3	14,8/5,8	20,0/24,6	14,1/12,8
	3, 8 – К 8–4	16,4/8,7	22,4/13,2	13,3/11,2
	5 – КШ ₀ 2–1	16,6/16,5	23,8/17,8	12,6/2,6
	6 – К 8–4	15,6/3,3	8,3/2,8	8,2/15,5
	10 – КО 2–1	15,2/13,3	22,4/18,2	17,8/2,6

Из данных, приведенных в табл.3, следует, что величины углов откоса шихтовых материалов зависят от исходного профиля поверхности засыпи, последовательности выгрузки и состава порций шихтовых материалов, уровня засыпи, а также от используемых в программе загрузки угловых позиций лоткового распределителя шихты. Для исследуемых периодов работы печи полученные значения углов откоса после выгрузки порций кокса (8–5 и 8–4) (табл.3) составляли 24,2°–33,9°, а для порций железосодержащих компонентов шихты АО, АОШ₀, АШ₀ их значения изменялись от 20,3° до 30,2°. Такой широкий диапазон изменения углов откоса материалов вызван, по нашему мнению, различными условиями газодутьевого режима работы и отличающимися программами загрузки, используемыми в эти периоды.

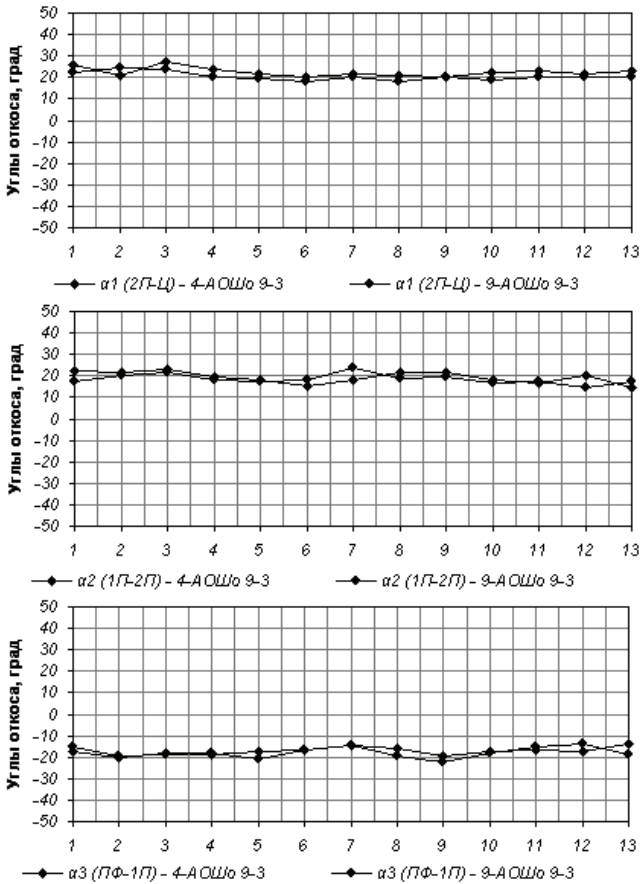


Рис.2. Изменение углов откоса поверхности засыпи $\alpha_{1...3}$ в кольцевых зонах сечения колошника после выгрузки порций 4-АО 9-3 и 9-АО 9-3 в ДП №9

Как следует из полученных результатов, величины углов откоса шихтовых материалов в условиях работающей доменной печи меньше углов их естественного откоса, что обусловлено, по-видимому, действием газового потока в печи, уменьшающего внутреннее трение в слое шихты и повышающего его подвижность.

На основе показаний радиолокационной системы установлено, что величины углов откоса поверхности засыпи в значительной мере определяются скоростями опускания шихты по сечению печи (рис.3,4). В качестве примера этой взаимосвязи рассмотрено изменение углов откоса поверхности засыпи при выгрузке в печь порции железосодержащих компонентов шихты АОШ₀ из позиций лоткового распределителя 9-3.

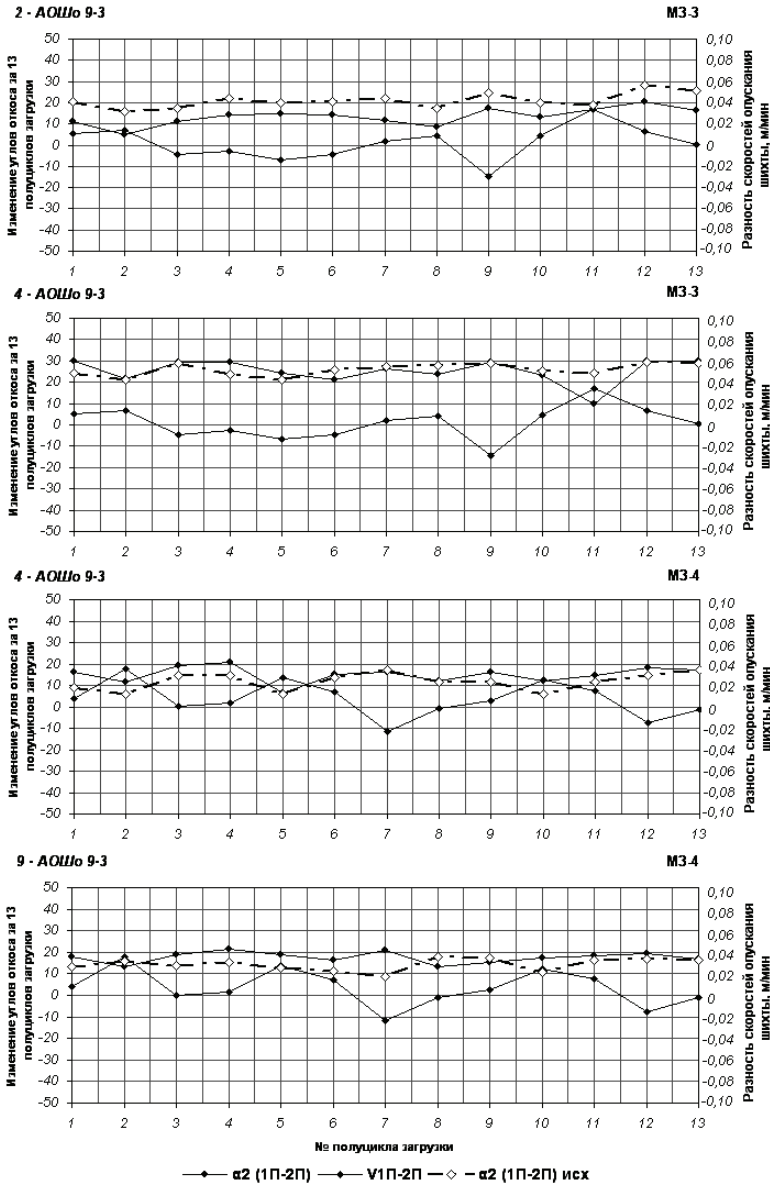


Рис.3. Изменение угла откоса поверхности засыпи α_2 после выгрузки порции АОШо 9-3 и разности скоростей опускания шихты в первой и второй промежуточных зонах сечения колошника печи, период III.

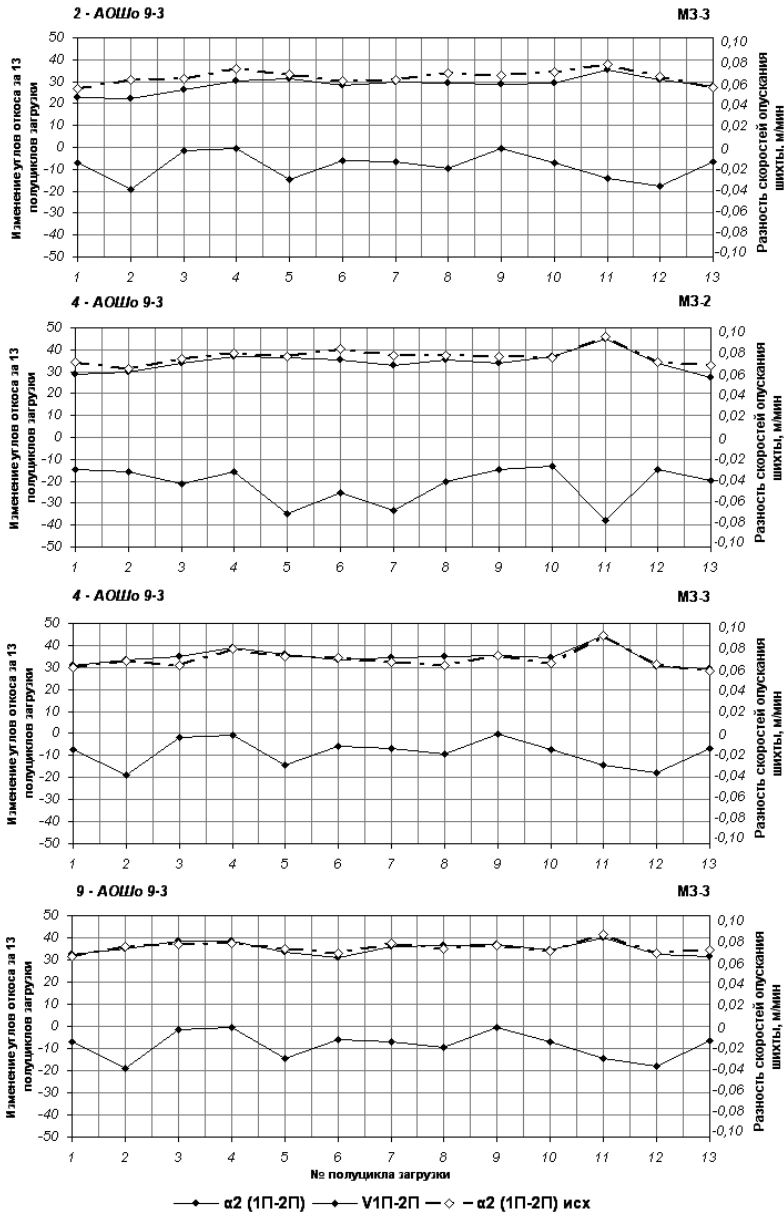


Рис.4. Изменение угла откоса поверхности засыпи α_2 после выгрузки порции АОШ₀ 9–3 и разности скоростей опускания шихты в первой и второй промежуточных зонах сечения колошника печи для последующих тринадцати циклов загрузки, период III.

При выгрузке этой порции происходит формирование профиля засыпи практически по всему радиусу колошника. Изменения угла откоса α_2 при загрузке 2-ой, 4-ой и 9-ой порций шихты АОШ, 9–3 и разницы скоростей опускания шихты в первой и второй промежуточных зонах ($V_{1П} - V_{2П}$), влияющих на формирование угла откоса α_2 , приведены на рис.3 и 4 для тринадцати циклов загрузки. Выбор сечений колошника (1П и 2П), в которых рассчитывается разница скоростей опускания шихты, обусловлен наибольшей подвижностью участка профиля поверхности засыпи, расположенного между зонами 1П и 2П. Из рис.3 и 4 следует, что увеличение скорости опускания шихты в первой промежуточной зоне, по сравнению со второй промежуточной зоной, сопровождается уменьшением значения угла откоса α_2 , при этом определенному значению разницы скоростей опускания шихты во второй и первой промежуточных зонах ($V_{1П} - V_{2П}$) соответствует одинаковое изменение угла откоса α_2 .

Выводы. Таким образом, с использованием радиолокационной системы измерения профиля поверхности засыпи определены значения углов откоса поверхности засыпи на колошнике после выгрузки порций шихтовых материалов в ДП №9. Установлено, что граничные величины углов откоса поверхности засыпи, образованной коксом и железосодержащими компонентами шихты, меньше значений углов естественного откоса материалов и могут быть использованы в качестве исходных данных для разработанной в ИЧМ математической модели радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, что в комплексе с заданием в модель фактического исходного (перед выгрузкой порции) профиля поверхности засыпи, повысит достоверность расчета показателей распределения шихты, необходимых для контроля и управления загрузкой печи.

1. *Математические модели радиального распределения шихты в доменных печах* / В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Е.А. Белашапка и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. науч. тр. ИЧМ – Вып. 8.* – Днепропетровск ИЧМ, 2004 – С. 86–102.
2. *Кройц Л., Бергман Б.* Распределение материалов в доменной печи, работающей с бесконусным засыпным аппаратом. // *Черные металлы*, – 1988. – №19. – С.3–10.
3. *Доменное производство «Криворожстали».* Монография под ред. чл.–корр. НАНУ В.И. Большакова / В.И. Большаков, А.В. Бородулин, Н.А. Гладков и др. // ИЧМ НАНУ, «Криворіжсталь». Дн–ск, Кр. Рог, 2004. – 378с.

*Статья рекомендована к печати
чл.–корр. НАН Украины В.И.Большаковым*