

**Большаков В.И. /академик НАН Украины/, Иванча Н.Г., Семенов Ю.С. /к.т.н./,  
Вишняков В.И., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В., Наследов А.В.,  
Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ);  
Подкорытов А.Л., Семион И.Ю., Кузнецов А.М. /к.т.н./, Зубенко А.В.,  
ПАО «Енакиевский металлургический завод» (ЕМЗ)**

### **Исследования параметров потока шихтовых материалов и их распределения на колошнике современной доменной печи**

*Приведены основные результаты исследований, выполненных перед задувкой доменной печи №3 ПАО «Енакиевский металлургический завод», оборудованной современным бесконусным загрузочным устройством. Ил. 7. Библиогр.: 10 назв.*

**Ключевые слова:** доменная печь, шихтовые материалы, загрузка, бесконусное загрузочное устройство, предпусковые исследования, распределение шихты

*The main results of investigations carried out before blowing a blast furnace number 3 PJSC "Enakievo Steel", equipped with modern bell-less charging device.*

**Key words:** blast furnace, burden materials, loading, bell-less charging device, pre-start research, burden distribution

Важнейшим направлением повышения эффективности работы доменных печей (ДП) является эффективное использование технологических возможностей системы загрузки путем совершенствования приемов распределения шихтовых материалов в печи в комплексе с выбором рациональных параметров дутьевого и газодинамического режимов плавки [1,2].

Для эффективного управления формированием порций шихтовых материалов, загрузки и распределения их в печи необходима комплексная информация о характере движения материалов по тракту загрузочного устройства и распределения их на поверхности засыпи шихты. В полной мере такие данные могут быть получены в ходе предпусковых исследований работы механизмов шихтоподачи и БЗУ, распределения шихтовых материалов на колошнике [3–6].

В октябре 2011 г. после проведения капитального ремонта I-го разряда была введена в эксплуатацию современная ДП №3 ПАО «Енакиевский металлургический завод (ЕМЗ)» объемом 1719 м<sup>3</sup>. ДП №3 оборудована лотковым бесконусным загрузочным устройством (БЗУ) фирмы «Paul Wurth», стационарными термозондами, расположенными над поверхностью засыпи, двумя радиолокационными уровнемерами (РУ), газоотборными зондами, инфракрасной камерой. БЗУ фирмы «Paul Wurth», установленное на ДП №3, по ряду основных параметров и конструктивных особенностей не имеет аналогов в Украине. Применяемый агрегат представляет собой однотрактное БЗУ, предусматривающее возможность загрузки шихтовых материалов с температурой до 400 °С.

Сотрудниками ИЧМ совместно с представителями ПАО «ЕМЗ» были выполнены исследования распределения шихты первого объема в ДП №3 перед задувкой, а также исследования изменения параметров загрузки, дутьевого режима и газораспределения в периоды задувки, раздувки и выхода печи на

рабочие показатели. Использование полученной информации для совершенствования режима загрузки печи шихтовыми материалами, повышения степени использования тепловой и восстановительной энергии печных газов в комплексе с выполненными в период ремонта мероприятиями по реконструкции огнеупорного стакана горна и лещади, повышения стойкости футеровки металлоприемника позволит увеличить продолжительность кампании печи до 15 лет.

Перед задувкой ДП №3 были выполнены следующие исследования:

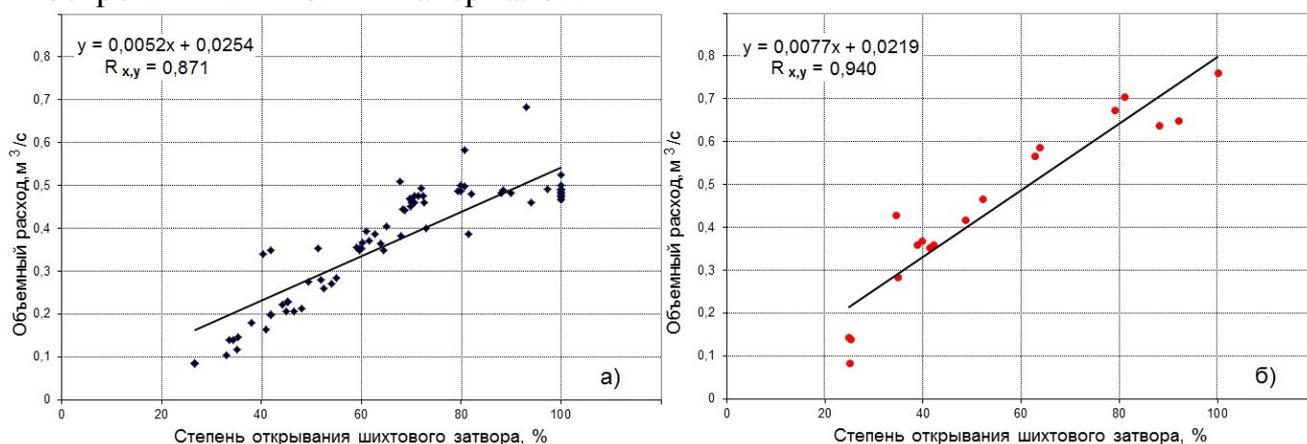
- определение расходных характеристик шихтового затвора бункера БЗУ;
- определение траекторий движения шихтовых материалов в колошниковом пространстве доменной печи и реализация в АСУ углов наклона лотка БЗУ;
- измерение уровня и поверхности засыпи шихтовых материалов при их загрузке в печь;
- исследование параметров потока шихтовых материалов и исследование распределения компонентов порций смеси агломерата и окатышей по радиусу колошника.

### ***Определение расходных характеристик шихтового затвора бункера БЗУ.***

В период выполнения исследований определены первичные расходные характеристики шихтовых затворов БЗУ при выгрузке железорудных компонентов и кокса. Результаты исследований приведены на рис. 1. Достаточно высокие значения коэффициентов корреляции (для железорудных компонентов  $r=0,940$ , для кокса  $r=0,871$ ) показывают, что зависимости объемного расхода шихтовых материалов (а при неизменной массе порции и времени истечения материалов из бункера БЗУ) от величины степени открывания шихтового затвора позволяют использовать данные зависимости в программном обеспечении АСУ для автоматизированного управления выгрузкой порций шихты. Следует отметить, что полученные зависимости требуют уточнения в процессе эксплуатации печи, что предусматривается проектными алгоритмами системы управления. На начальном этапе раздувки печи было рекомендовано время выгрузки порций шихты из БЗУ поддерживать для железорудных материалов на уровне – 80 с, для кокса – 90 с. При этом во время исследований, указанным значениям времени выгрузки соответствовали следующие значения степени открывания шихтового затвора: для железорудных материалов – 33%, для кокса – 40%. Через месяц после задувки печи в связи с необходимостью обеспечения пропускной способности системы шихтоподачи на уровне 8 подач в час (при работе с рудной нагрузкой 3,95 т/т) было рекомендовано уменьшить время выгрузки железорудных материалов до 70 с и кокса – до 80 с, что соответствовало степени открывания шихтового затвора 37% для железорудных материалов и 44% для кокса.

Как показывает опыт освоения доменных печей, оборудованных БЗУ, увеличение времени выгрузки порций шихтовых материалов способствует рациональному распределению материалов по радиусу и окружности колошника и должно быть максимально возможным для условий требуемой интенсивности плавки, определяющей скорость схода шихты и темп загрузки печи [7]. Время выгрузки порций шихты задается в соответствии с расходной характеристикой шихтового затвора БЗУ, которая определяется по результатам предпусковых исследований.

Возможный диапазон регулирования объемного расхода шихтовых материалов при обеспечении достаточной точности распределения шихтовых материалов на колошнике для условий ДП №3 составляет: для кокса – 0,124 – 0,337 м<sup>3</sup>/с и 0,160 – 0,337 м<sup>3</sup>/с – для железосодержащих материалов. Величина объемного расхода – 0,337 м<sup>3</sup>/с достаточна для обеспечения максимальной пропускной способности системы загрузки в режиме «догонка меры». Меньшие значения объемных расходов могут задаваться только в тех случаях, когда работа системы загрузки в режиме «догонка меры» не требуется, и в цикле загрузки порций имеется резерв времени для увеличения продолжительности выгрузки порций. Нижний предел указанного выше диапазона значений объемных расходов (0,124 м<sup>3</sup>/с – для кокса и 0,160 м<sup>3</sup>/с – для железосодержащих материалов) установлен, исходя из экспериментально определенных условий «кострения» шихтовых материалов.



**Рис. 1.** Зависимости объемного расхода от степени открывания шихтового затвора для кокса (а) и железорудных материалов (б) при выгрузке из бункера БЗУ.

Время выгрузки порций шихты ( $\tau_{\text{выгр}}$ ) определяется в зависимости от объема порции ( $V, \text{м}^3$ ) и заданного объемного расхода ( $Q, \text{м}^3/\text{с}$ ) согласно выражению:  $\tau_{\text{выгр}} = \frac{V, \text{м}^3}{Q, \text{м}^3/\text{с}}, \text{с}$

При этом для корректного определения объема порции необходима информация о фактической насыпной массе каждого из компонентов шихтовых материалов.

### ***Определение границ и траекторий потока шихтовых материалов по высоте и сечению печи. Выбор рабочих значений угловых положений лотка БЗУ.***

Расчет рационального состава и правильный выбор режима загрузки задувочной шихты являются факторами, в значительной степени определяющими успешную задувку и работу доменной печи в раздувочном периоде [8].

При разработке программы загрузки шихты первого объема, следует учитывать, что при загрузке нижних горизонтов печи необходимо предотвратить повреждение футеровки шахты, распара, заплечиков и фурм загружаемым материалом и, по мере возможности, минимизировать измельчение шихтовых материалов. Кроме того, при загрузке шихты, содержащей наряду с коксом шлак и железорудные материалы, следует обеспечить требуемое распределение компонентов по сечению печи. Очевидно, что для правильного выбора угловых положений лотка, которые используются при загрузке задувочной шихты на

различные горизонты печи, необходимо уточнение расчетных траекторий движения шихтовых материалов после схода с распределительного лотка по всей высоте рабочего пространства доменной печи [1, 2, 8].

В расчетах параметров распределения шихтовых материалов движение потока материала в колошниковом пространстве печи, как правило, характеризуется траекторией движения его центральной части. При разработке программ загрузки горизонтальное сечение колошника доменных печей, оснащенных БЗУ, разбивается, как правило, на 10 равных по площади кольцевых зон в соответствии с количеством основных рабочих угловых положений лотка (за исключением наладочных положений и положений, предназначенных для выгрузки шихтовых материалов непосредственно под стенку колошника и в ось печи). Рациональные значения углов наклона лотка в рабочих положениях должны обеспечивать пересечение траектории центра потока шихты со средней линией соответствующей кольцевой зоны колошника. Следует учесть, что с изменением уровня засыпи, координаты точек пересечения траекторий падения потоков шихты с поверхностью засыпи также изменяются. В связи с этим, в современных системах управления БЗУ матрицы углов наклона лотка предусматривают возможность задания значений углов для различных уровней засыпи, задаваемых с шагом 0,10 – 0,25 м. Изменение реализуемого ряда углов наклона лотка осуществляется в автоматическом режиме при изменении задания уровня засыпи [1].

Расчет траекторий движения центров тяжести потоков шихты в рабочем пространстве печи осуществлялся при помощи уточненной математической модели ИЧМ. Результаты расчета позволили определить рабочие значения углов наклона лотка для загрузки десяти кольцевых зон колошника и двух дополнительных угловых положений для загрузки шихтовых материалов непосредственно под стенку колошника и в ось печи.

Для оценки и уточнения результатов расчета углов наклона лотка и параметров потока шихтовых материалов, выгружаемых с лотка БЗУ на поверхность засыпи шихты, границы вертикального и горизонтального его сечений определялись инструментальными измерениями точек встречи потока с плитами колошниковой защиты (рис. 2а), с поверхностью радиальных газоотборных зондов (рис. 2б) [5] (уровень засыпи – 3,6 м), а также с деревянным брусом, установленным наклонно на поверхности засыпи шихты (рис. 2в).

Общие границы потока определялись для учета особенностей движения материала по распределительному лотку, отражения части потока кокса от торцевой стяжки лотка, поверхности стационарных термобалок и последующего его рассредоточения при движении в колошниковом пространстве печи до уровня радиальных зондов. Замеры границ движения интенсивного потока материала использовались впоследствии для уточнения исходных данных моделирования траекторий движения шихтовых материалов в рабочем пространстве печи.

Результаты выполненных замеров параметров движения потоков кокса и железосодержащих материалов позволили уточнить расчетные траектории движения шихтовых материалов в рабочем пространстве печи и определить углы наклона лотка, обеспечивающие требуемый диапазон регулирования распределения шихтовых материалов на колошнике. Расчетные значения углов наклона лотка, определенные на основании экспериментальных данных для

различных значений уровня засыпи с шагом 0,1 м, были введены в соответствующие матрицы системы управления БЗУ ДП №3.

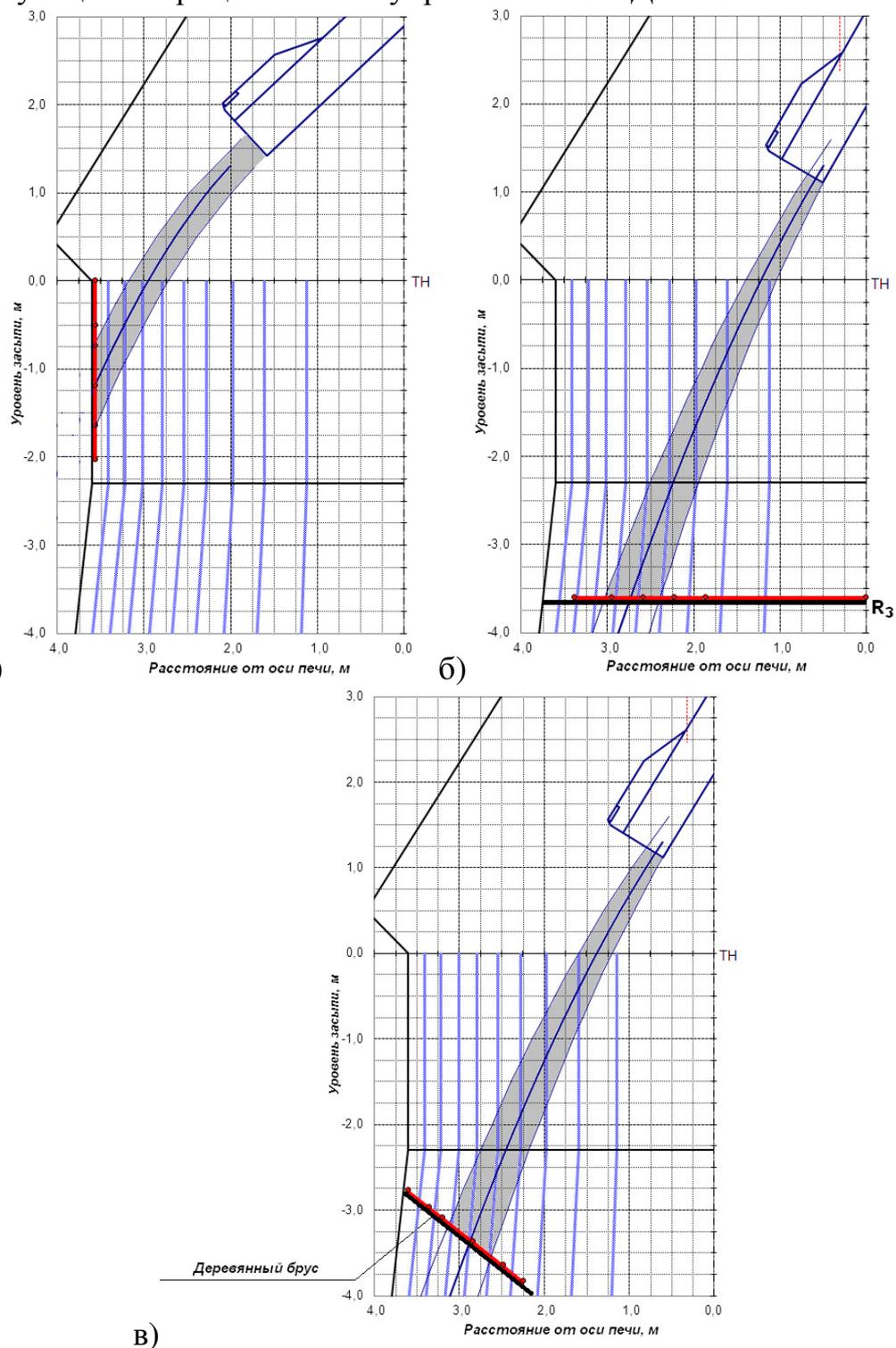


Рис. 2. Границы вертикального сечения потока шихтовых материалов (а); горизонтального сечения потока (б) и границы потока определенные измерениями точек встречи потока с деревянным брусом, установленным наклонно на поверхности засыпи шихты (в).

### *Исследование формирования профиля поверхности засыпи шихты.*

На форму поверхности засыпи, расположение геометрического гребня профиля после выгрузки порций шихтовых материалов, помимо их физико – механических свойств, существенно влияют уровень засыпи, углы наклона лотка, величина открывания шихтового затвора бункера БЗУ, а также параметры профиля после выгрузки предыдущей порции шихты (исходный профиль засыпи) [2].

Оценка формирования поверхности засыпи шихты выполнялась по данным измерений уровней засыпи в 60 точках непосредственно на поверхности засыпи после выгрузки восьми последних порций задувочной шихты (№ 103–110). Результаты замеров представлены на рис. 3.

Режим выгрузки в печь исследовательских порций №№ 103–110 шихтовых материалов в печь характеризовался следующими параметрами.

Порция № 103 – кокс –  $M_k=5,4$  т, угол наклона лотка  $49,0^\circ$ , время выгрузки – 128 с,  $\alpha_{шз}$  – 26,7%, вращение лотка – против часовой стрелки.

Порция № 104 – кокс –  $M_k=2,8$  т, угол наклона лотка  $37,5^\circ$ , время выгрузки – 11 с,  $\alpha_{шз}$  – 67,7%, вращение лотка – по часовой стрелке.

Порция № 105 – кокс –  $M_k=10,7$  т, углы наклона лотка  $28,1^\circ$  и  $21,6^\circ$ , время выгрузки – 146 с,  $\alpha_{шз}$  – 35,4%, вращение лотка – против часовой стрелки.

Порция № 106 – агломерат (А)+шлак (Ш)+руда (Р) –  $M_p=31,6$  т (А–24,62т, Ш–4,31т, Р–2,67 т), углы наклона лотка  $38,4^\circ$ ,  $29,3^\circ$  и  $21,8^\circ$ , время выгрузки – 121 с,  $\alpha_{шз}$  – 24,8%, вращение лотка – по часовой стрелке.

Порция №107 – кокс –  $M_k=10,2$  т, угловые положения лотка 8-4, время выгрузки – 147 с,  $\alpha_{шз}$  – 34,3%, вращение лотка – по часовой стрелке.

Порция №108 – А+окатыши (О)+Ш– $M_p=34,4$ т (А–19,46 т, О–12,97т, Ш–1,97 т), угловые положения 9-4, время выгрузки – 25 с,  $\alpha_{шз}$  – 81%, вращение лотка – против часовой стрелки.

Порция №109 – кокс –  $M_k=10,2$  т, угловые положения лотка 8-4, время выгрузки – 240 с,  $\alpha_{шз}$  – 26,7%, вращение лотка – против часовой стрелки.

Порция №110 – А+О+Ш –  $M_p=34,0$  т (А–12,82 т, О–19,23 т, Ш–1,94 т), угловые положения 9-4, время выгрузки – 40 с,  $\alpha_{шз}$  – 34,4%, вращение лотка – по часовой стрелке.

Анализ экспериментальных данных показал следующие тенденции формирования поверхности засыпи после загрузки исследуемых порций.

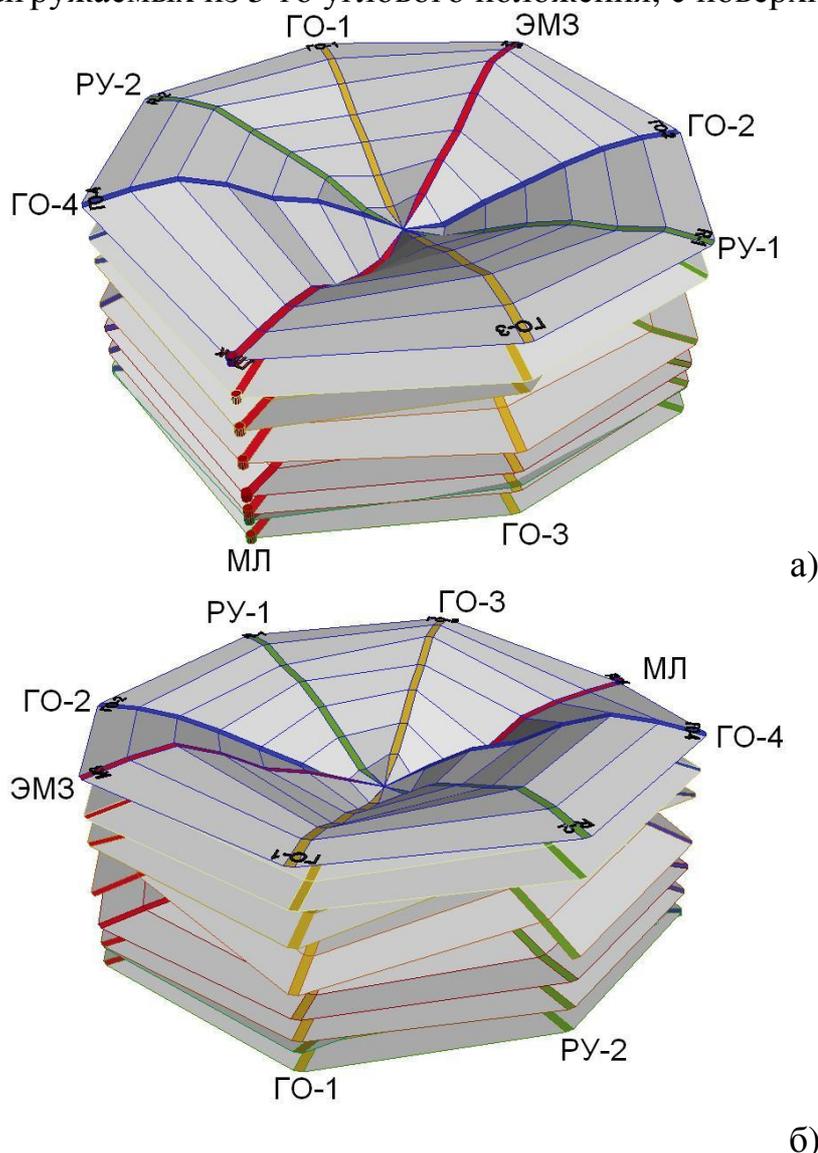
Выгрузка восьми исследуемых порций сопровождалась понижением уровня засыпи поверхности шихты на радиусах МЛ (монтажный люк) на 0,50 м в среднем и ГО-4 (газоотводом №4) на 0,48 м в среднем, в то время как на радиусе РУ2 (радиолокационный уровнемер) понижение уровня засыпи составило 0,13 м и на радиусе ГО-3 – 0,22 м. Наличие окружной неравномерности уровней засыпи было вызвано отработкой в случайном режиме начала открывания шихтового затвора выгрузки порций шихты. Отмечена также неравномерность распределения шихты по окружности, вызванная влиянием термозондов, которые обусловили образование углублений с разностью уровней шихты величиной 0,57 м в зоне их установки при среднем уровне засыпи 3,19 м. При среднем уровне засыпи 1,95 м эта разность уменьшилась до 0,33 м. Влияние термозондов на формирование неравномерности поверхности засыпи шихты показано на рис. 4.

После выгрузки порции кокса №103 массой 5,4 т с углом наклона лотка  $49,0^\circ$ , измеренный профиль поверхности засыпи характеризовался образованием горизонтальной «полки» на периферии шириной 0,5 м.

Поверхность засыпи, образованная после выгрузки порции кокса № 104 массой 2,8 т с углом наклона лотка  $37,5^\circ$  на уровень засыпи – 4,38 м

характеризовался наличием кольцевого участка на периферии шириной 0,5 – 0,8 м с углом наклона поверхности этого участка к центру печи  $\approx 20^\circ$ .

После выгрузки порции кокса №105 массой 10,7 т с углами наклона лотка  $28,1^\circ$  и  $21,6^\circ$  на уровень засыпи 4,24 м было зафиксировано образование «гребней» на радиусах МЛ, ГО-4 и ГО-3 на расстоянии 1,0 м от стенки печи с максимальным углом наклона поверхности засыпи от «гребня» к стенке печи –  $10^\circ$  и от «гребня» к оси печи –  $12^\circ$ . Указанное расположение «гребней» соответствовало координатам точки встречи центра потока шихтовых материалов, выгружаемых из 5-го углового положения, с поверхностью засыпи.



ЭМЗ – электромеханический зонд, ТЗ-1, ТЗ-2 – стационарные термозонды, РУ-1, РУ-2 – радиолокационные уровнемеры, ГО-1...ГО-4 – газоотводы, МЛ – монтажный люк

**Рис. 3. Поверхности засыпи шихтовых материалов, образовывавшиеся после выгрузки семи последних порций задувочной шихты (вид со стороны МЛ (а), со стороны ГО-1 (б)).**

После выгрузки порции железосодержащих материалов №106 массой 31,6 т с углами наклона лотка  $38,4^\circ$ ,  $29,3^\circ$  и  $21,8^\circ$  на уровень засыпи – 3,67 м было зафиксировано образование явно выраженных «гребней» на радиусах РУ-1, ГО-4 и ГО-3 на расстоянии 1,0 м от стенки печи с максимальным углом наклона поверхности засыпи от «гребня» к стенке печи –  $12^\circ$  и от «гребня» к оси печи –  $20^\circ$ . Указанное расположение «гребня» также соответствовало координатам точки встречи центра потока шихтовых материалов, выгружаемых из 5-го углового положения, с поверхностью засыпи. На остальных обозначенных на

рис. 3 радиусах из-за перекоса поверхности засыпи «гребни» зафиксировать не удалось.



**Рис. 4.** Влияние термозондов на формирование окружной неравномерности поверхности засыпи шихты (поверхность засыпи шихты после выгрузки порции №104, уровень засыпи 4,1 – 4,4 м).

По мере выгрузки четырех исследовательских порций №№107-110 глубина осевой воронки поверхности засыпи шихты в среднем по восьми радиусам увеличивалась от минимального значения после выгрузки порции №107, составившего 0,11 м, до 0,45 м – после выгрузки порции №108, 0,97 м – после выгрузки порции №109 и достигла значения – 1,06 м после выгрузки порции №110. При этом увеличивалась и разность уровней засыпи (разница максимального и минимального уровней засыпи) по восьми измеряемым радиусам.

#### ***Исследования гранулометрического и компонентного состава слоя железосодержащих материалов по радиусу колошника.***

Оптимизация режима загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, включает рациональное распределение как рудных нагрузок в кольцевых зонах сечения колошника, так и состава смеси разноосновных рудных компонентов, в частности, агломерата и окатышей. Последнее должно исключать локальное сосредоточение массивов низкоосновных окатышей в отдельных зонах печи, особенно в пристеночной ее зоне, в связи с их негативным влиянием на стойкость футеровки и гарнисажеобразование в шахте печи. Увеличение количества окатышей в периферийной зоне приводит к снижению основности материала, формированию агрессивных оксидных расплавов с низкой текучестью, разрушающих огнеупорную кладку печи, а также к увеличению доли монооксида железа в первичных шлаках, что обуславливает размывание и оползание гарнисажа, неустойчивый нагрев и ход печи, горение фурм.

Одним из технологических приемов ограничения попадания окатышей в пристеночную зону печи, разработанным в ИЧМ, является формирование смешанных железорудных порций с головной частью, состоящей из агломерата [9, 10]. В системах загрузки со скиповой доставкой шихты на колошник головная часть железорудной порции формируется из агломерата, загружаемого наверх первого скипа. В некоторых случаях в первый скип загружается только материал, составляющий головную часть порции, а все остальные компоненты порции загружаются во второй скип.

Количественная оценка влияния массы головной части смешанной порции на распределение агломерата и окатышей по радиусу колошника выполнена с использованием телескопических пробоотборников цилиндрической формы, состоящих из двух, близких по объему, вертикальных секций. Пробоотборники устанавливались на слой кокса перед выгрузкой исследовательской железосодержащей порции АОШ 9-4 ( $M_A=19,46$  т – 56,57%,  $M_O=12,97$  т – 37,70%,  $M_{Ш}=1,97$  т – 5,73%) по радиусу колошника, расположенному в секторе установки радиолокационного уровнемера РУ1 со стороны наклонного моста на расстоянии в среднем 1,2 м друг от друга (рис. 5). Структура порции АОШ, формировавшейся в процессе исследований, показана на рис. 6. Распределение агломерата и окатышей по радиусу колошника после выгрузки этой порции представлено на рис. 7.

Результаты выполненных экспериментальных исследований показывают, что масса головной части порции из агломерата (масса агломерата, загруженного в первый скип без окатышей) на уровне 18,0 – 20,0 т обеспечивает распределение железорудных компонентов по радиусу колошника достаточно близкое к технологическим требованиям: содержание окатышей на периферии печи не превышает 11,0% с максимумом в промежуточной зоне и плавным убыванием количества этого материала к оси печи [9, 10].



Рис. 5. Установка цилиндрических пробоотборников на поверхности кокса перед выгрузкой исследовательской железорудной порции АОШ 9-4 (№1 – ось; №4 – стенка).

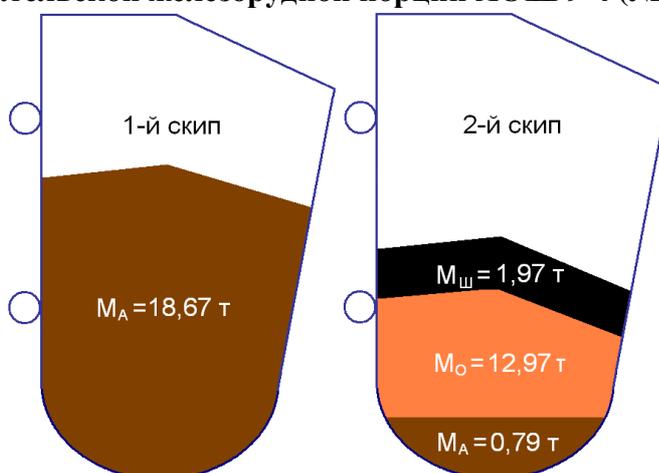
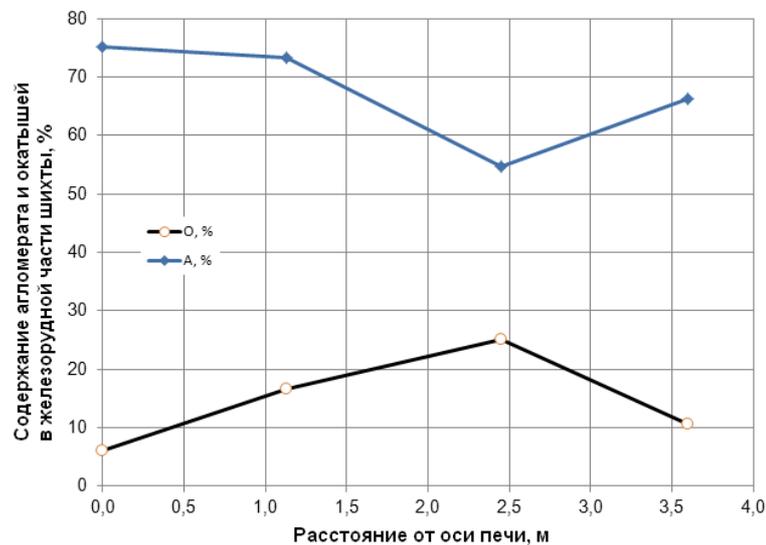


Рис. 6. Структура исследовательской железорудной порции АОШ 9-4 (последовательность набора компонентов в скипы).



**Рис. 7.** Распределение агломерата и окатышей по радиусу колошника после выгрузки исследовательской железорудной порции АОШ 9-4.

## Выводы

Исследования параметров потоков шихтовых материалов, загружаемых в доменную печь при помощи БЗУ, распределения массы порций и их компонентов на колошнике, выполненные перед пуском доменной печи №3 ПАО «ЕМЗ», а также определение расходных характеристик шихтового затвора бункера БЗУ, исследование формирования профиля поверхности засыпи шихты, гранулометрического и компонентного составов слоя железосодержащих материалов по радиусу колошника позволили после задувки печи определить и реализовать режимы работы механизмов БЗУ, необходимые для эффективного применения разрабатываемых программ загрузки доменной печи.

## Библиографический список

1. Большаков В. И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / Большаков В. И. – К.: Наук. думка, 2007. – 412 с.
2. Большаков В. И. Теория и практика загрузки доменных печей / Большаков В. И. – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.
3. Исследование влияния конструктивных особенностей загрузочных устройств на распределение шихты в доменной печи / Большаков В.И., Варивода И.Е., Рослик Н.А., Шулико С.Т., Шутылев Ф.М. // Сталь. –1999. –№1. – С.10–14.
4. Освоение системы загрузки современной доменной печи / В.И. Большаков, А.Ю. Зарембо, Н.Г. Иванча и др. // Обз. инф. Ин–т «Черметинформация». – М. – 1989. – 53с.
5. Предпусковые исследования распределения материалов в доменной печи объемом 5500 м<sup>3</sup> / Н.М.Можаренко, В.И.Большаков, А.Ю.Зарембо и др. // Черная металлургия. Наука–техника–производство. Тр. ИЧМ. М.: Металлургия. 1989. – С. 56–63.
6. Освоение на доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> первого отечественного бесконусного загрузочного устройства и технологии плавки с его использованием. / В.Д.Гладуш, И.И.Дышлевич, В.И.Большаков и др. // Сталь. 1985, № 11. – С. 7–13.

7. Большаков В.И. Анализ пропускной способности систем загрузки при проектировании реконструкции доменной печи. // *Металлург*, 1986, № 2. – С. 14–16.
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. Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / В.И.Большаков, Н.А.Гладков, Ф.М.Шутылев, Ю.А.Богачев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – №6. – С.11–15.
10. Большаков В.И., Гладков Н.А., Шутылев Ф.М. Совершенствование распределения окатышей по сечению доменной печи // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003, № 1. – С. 12–15.