

*Приобретать познания
еще недостаточно
для человека, надо уметь
отдавать их в рост
Иоганн Вольфганг фон Гете
(1749 – 1832)*

НОВЫЕ ПОДХОДЫ В УПРАВЛЕНИИ ЗАГРУЗКОЙ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ, ОБОРУДОВАННОЙ БЗУ, В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ РАБОТЫ

Ю.С. Семенов, к.т.н., с.н.с.

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

E-mail: yuriy.semenov.isi@gmail.com

Важным направлением повышения эффективности работы доменных печей (ДП) является совершенствование режимов загрузки шихтовых материалов в доменную печь и рациональное их распределение по радиусу и окружности колошника. По современным представлениям уровень технико-экономических показателей работы доменных печей в значительной мере определяется эффективным формированием столба шихты и газового потока. Этому способствует применение на доменных печах бесконусных загрузочных устройств (БЗУ) [1, 2]. В последние годы реконструированные или вновь строящиеся ДП оснащаются БЗУ, которые в отличие от конусных загрузочных устройств (КЗУ), обладают широкими возможностями управления как радиальным, так и окружным распределением шихтовых материалов [1].

Под руководством академика НАН Украины В.И. Большакова на протяжении многих лет в ИЧМ проводились работы по освоению ДП, в основном, большого объема (более 2000 м³), оборудованных БЗУ, и выбору рациональных программ загрузки [1]. Как показывает опыт разработки программ загрузки печи, оборудованных БЗУ, традиционно порции шихтовых материалов распределяют практически по всему радиусу колошника и с различной цикличностью выгружают кокс в центральную зону колошника для формирования осевой отдушины (зоны повышенной газопроницаемости). По рабочим угловым положениям лотка шихтовые материалы принято распределять, как правило, с заданной неравномерностью, что позволяет без изменения структуры программы загрузки оперативно изменять рудные нагрузки и (или) объемы материалов в зонах, где ход ДП требует такого изменения [1, 3]. При таком формировании программ загрузки обеспечивается укладка материалов с минимальным перераспределением шихты вдоль радиуса.

В настоящей статье представлены результаты практического освоения программ загрузки на ДП №3 ПАО «Енакиевский металлургический завод» (ЕМЗ) после введения печи в эксплуатацию в октябре 2011 г. с установкой второго в Украине БЗУ фирмы “Paul Wurth” [4–6], позволившие в условиях нестабильного и низкого качества шихтовых материалов получить новые знания о влиянии режимов загрузки на показатели работы печи, пересмотреть существующие подходы при разработке рациональных программ загрузки, а также обосновать возможность использования информации средств контроля для управления процессами плавки в современных условиях работы².

² В работе принимали участие специалисты ИЧМ: к.т.н., н.с. Е.И. Шумельчик, н.с. В.В. Горупаха, м.н.с. А.В. Наследов; от ПАО «ЕМЗ»: к.т.н., нач. доменного цеха А.М. Кузнецов, нач. аглодоменного отдела – главный специалист по агло-доменному производству А.В. Зубенко

Рациональные режимы загрузки доменной печи для условий работы с нестабильными низким качеством шихтовых материалов при малой величине массы подачи

Важным параметром режима загрузки ДП является величина массы подачи. Известные исследования, направленные на изучение влияния массы подачи на показатели работы ДП, основаны на экспериментальном ее выборе в зависимости от конкретных условий плавки: качестве шихтовых материалов, количестве вдуваемого природного газа и прочих [7–11]. Как следует из результатов этих исследований, при увеличенной массе подачи ход печи приобретает периферийный характер, при уменьшенной – центральный. Это связано с изменением углов наклона поверхности шихты в печи при изменении величины подачи, которые при формировании поверхности шихты КЗУ определяют перераспределение материалов от стенки печи к центру с соответствующим изменением распределения газового потока по радиусу печи. При формировании поверхности засыпи шихты БЗУ определяющую роль играет программа загрузки печи, которая позволяет при различной массе подачи и уровне засыпи обеспечить практически неизменным распределение рудных нагрузок (РН) и объемов шихтовых материалов по радиусу печи. Вместе с тем, на печах, оборудованных как БЗУ так и КЗУ, уменьшение массы подачи на 15–20% обычно приводит к увеличению средней температуры на периферии на 50–60°C и уменьшению содержания CO₂ в колошниковом газе на 1–2%, что влечет за собой перерасход кокса. Из результатов исследований, выполненных ранее следует также, что обоснованного способа расчета величины подачи для печей того или иного объема не существует.

По мнению иностранных исследователей, эффективная доменная плавка в значительной степени определяется формированием на колошнике слоев кокса и железосодержащих материалов толщиной не менее 0,5 м. При работе ДП с малыми величинами массы подачи указанная толщина слоев не обеспечивается, а с учетом установленного немецкими исследователями эффекта проникновения железосодержащих материалов при выгрузке с БЗУ на 0,15 м в кокс [12, 13], образование слоев с расчетной толщиной менее 0,5 м способствует еще большему уменьшению газопроницаемости. [14].

Реализованные на ДП №3 программы загрузки, разработанные в соответствии с сформулированными ранее в ИЧМ положениями, на начальном этапе работы печи обеспечивали стабильный ход печи и приемлемые технико-экономические показатели доменной плавки, поскольку качество железорудного сырья и кокса при этом было удовлетворительным [4–6].

Со второй половины 2012 г. существенно ухудшилось качество шихтовых материалов. Переход на высокоосновный агломерат (основность по CaO/SiO₂ увеличилась от 1,2 до 2,2 ед.) при неудовлетворительном состоянии оборудования аглофабрики завода с одновременно низким качеством аглошихты способствовал существенному увеличению мелких фракций в скиповом агломерате и среднеквадратичного отклонения его основности.

Вместе с этим, по сравнению с начальным этапом эксплуатации печи, средневзвешенное значение показателя горячей прочности (CSR) кокса, уменьшилось от 51 % до 43 % а показателя реакционной способности (CRI) увеличилось от 31 % до 39 %. Эти факторы при отсутствии возможности использования промывочных материалов привели к увеличению количества споровших фурм. Сложившиеся условия обуславливали работу ДП с малой величиной массы подачи и низким уровнем засыпи (ниже 2,5 м). Масса коксовых порций составляла 7,0–8,0 т (при максимально возможной 10,5 т), что

соответствовало толщине слоя кокса менее 0,40 м. Такие параметры загрузки позволяли в этот период минимизировать верхние «подвисания» и обеспечивать центральное газораспределение. Однако, сохранявшееся интенсивное горение воздушных фурм, снижение производительности печи и высокий расход кокса в таких условиях работы печи обусловили пересмотр подходов к разработке рациональных программ загрузки БЗУ с поиском новых, ранее не используемых, решений.

Так, одной из отличительных особенностей новой программы загрузки явилось уменьшение (с шести – восьми до пяти) количества рабочих угловых положений лотка БЗУ при выгрузке каждой порции цикла загрузки. Это позволило увеличить толщину слоев шихтовых материалов на загружаемых участках радиуса печи. Помимо этого, в предложенной программе загрузки каждая последующая порция цикла загрузки смещала условный «гребень» шихтовых материалов относительно условного «гребня», сформированного выгрузкой предыдущей порции, что направлено на изменение направления движения газового потока.

Для анализа программ загрузки и оценки получаемого с их использованием распределения материалов по радиусу печи, как правило, используют общепринятые показатели распределения – объемы и РН за цикл загрузки печи в десяти равных по площади зонах колошника [1, 2]. Заданное распределение этих показателей по радиусу печи за цикл загрузки можно обеспечить множеством вариантов программ загрузки. При разработке новой программы загрузки для условий работы ДП №3 ПАО «ЕМЗ» для анализа используемых программ с целью выявления их отличительных признаков и особенностей были использованы оригинальные показатели [4] оценки программы загрузки:

– первый показатель – положение условного «гребня» каждой порции кокса (C_K) и железосодержащих материалов ($C_{ЖСМ}$) в цикле загрузки. Этот показатель качественно характеризует положение центра тяжести слоя материалов по радиусу колошника. Численное значение предложенного показателя отражает равновеликую зону сечения колошника (от 1 до 10), относительно которой концентрируется максимальный объем материалов в слое. Показатель положения условного «гребня» каждой порции определяется согласно следующему выражению:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{10} i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^{10} M_i},$$

где i – номер углового положения лотка, M – масса материалов, выгружаемых из углового положения лотка;

– второй показатель – количество рабочих угловых положений лотка при выгрузке кокса (N_K) и железосодержащих материалов ($N_{ЖСМ}$) в цикле загрузки. Этот показатель отражает относительное растягивание объемов каждой порции по радиусу колошника;

– третий показатель – расчетные РН в десяти равных по площади зонах колошника внутри цикла загрузки после выгрузки каждой пары порций кокса и железосодержащих материалов (далее после выгрузки каждой подачи). С помощью этого показателя возможна оценка изменения РН в каждой из зон внутри структуры столба шихты, сформированной выгрузкой цикла загрузки.

С помощью предложенных показателей выполнен сравнительный анализ программ загрузки – используемой в 2012 г. (до ухудшения сырьевых условий) и реализованной в 2013 г. (после ухудшения сырьевых условий).

Для программы загрузки, используемой в 2012 г., показатели положения условного «гребня» порций в цикле загрузки составили: для порций осевого кокса $C_K=3,0$, для остальных коксовых порций $C_K=6,3$, для железосодержащих порций –

$C_{жсм}=6,9, 7,1$ и $7,5$. Для программы загрузки, реализованной в 2013 г., показатели положения условного «гребня» порций изменяются в более широком диапазоне: так, для порций осевого кокса $C_k=2,1$, для остальных коксовых порций $C_k=5,8, 5,9$ и $6,8$, для железосодержащих порций – $C_{жсм}=5,4, 5,9, 6,2, 6,9$ и $8,9$. Таким образом, для программы загрузки, реализованной в 2013 г., показатель $C_{жсм}$ изменяется в диапазоне $5,4–8,9$ по сравнению с его изменением $6,9–7,5$ для программы загрузки, используемой в 2012 г. Это свидетельствует о том, что рекомендуемая программа загрузки, по сравнению с используемой ранее, обеспечивает расширение диапазона изменения положения условного «гребня» шихтовых материалов в цикле загрузки.

Показатель количества рабочих угловых положений лотка в цикле загрузки для программы загрузки, используемой в 2012, составил для кокса $N_k=6–8$, для железосодержащих материалов $N_{жсм}=7–8$. Это приводило к «растягиванию» порций цикла загрузки практически по всему радиусу колошника, а с учетом работы ДП №3 с малой величиной массы подачи, обеспечивало толщину слоев $0,3–0,4$ м. Для программы загрузки, реализованной в 2013 г., $N_k = N_{жсм} = 5$, что позволяет обеспечить на отдельных участках радиуса колошника концентрированные локально сосредоточенные слои шихтовых материалов с толщиной более $0,5$ м при неизменной величине массы подачи, и увеличить газопроницаемость за счет уменьшения количества резко очерченных границ разнородных слоев. На рис. 1 представлены графики изменения расчетных высот слоев по радиусу печи после выгрузки трех порций железосодержащих материалов в цикле загрузки (№2, №4 и №8) для двух рассматриваемых программ загрузки (обозначены 2012 и 2013). Как видно из графиков, используемая в 2012 г. программа загрузки практически не обеспечивала высоту слоя, превышающую $0,5$ м, в то время как программа загрузки, реализованная в 2013 г. обеспечивает высоту слоя $0,6–0,7$ м на различных, изменяющихся от порции к порции в цикле загрузки свое положение, участках радиуса печи. Расчетные высоты слоев и РН получены с помощью, разработанной в ИЧМ и адаптированной к условиям ДП №3 ПАО «ЕМЗ», модельной системы для поддержки принятия решений по выбору и корректировке программ загрузки [15]. На рис. 2 представлены сравнительные расчетные структуры столба шихтовых материалов для двух программ загрузки.

Анализ распределения расчетных РН в десяти равных по площади зонах колошника внутри цикла загрузки после выгрузки каждой подачи для программы загрузки, используемой в 2012 г. (рис. 3 а) и установленной в 2013 г. (рис. 3 б) показал, что реализованная в 2013 г. программа загрузки характеризуется большим диапазоном изменения РН в каждой зоне колошника от подачи к подаче. Особенно характерна периферийная зона, где диапазон изменения РН для программы загрузки, предложенной в 2013 г., составляет от $2,35$ т/т до $9,66$ т/т ($\sigma_{РН}=2,64$ т/т) по сравнению с диапазоном изменения РН для программы загрузки, реализованной в 2012 г., – от $3,51$ т/т до $5,28$ т/т ($\sigma_{РН}=0,63$ т/т). Указанная особенность при использовании кокса низкого качества, по мнению автора, способствует повышению газопроницаемости и увеличению степени использования восстановительной способности газов за счет увеличения времени пребывания газов в печи.

Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы

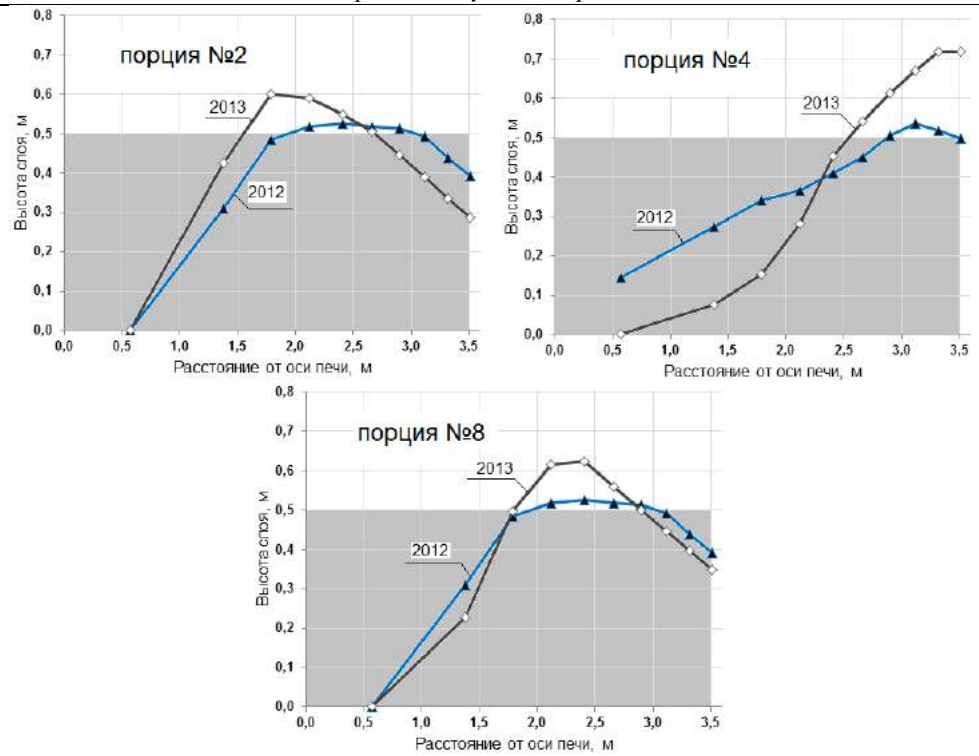


Рис.1. Изменение высоты слоев по радиусу печи после выгрузки железосодержащих порций для программ загрузки, используемых в 2012 г. и в 2013г.

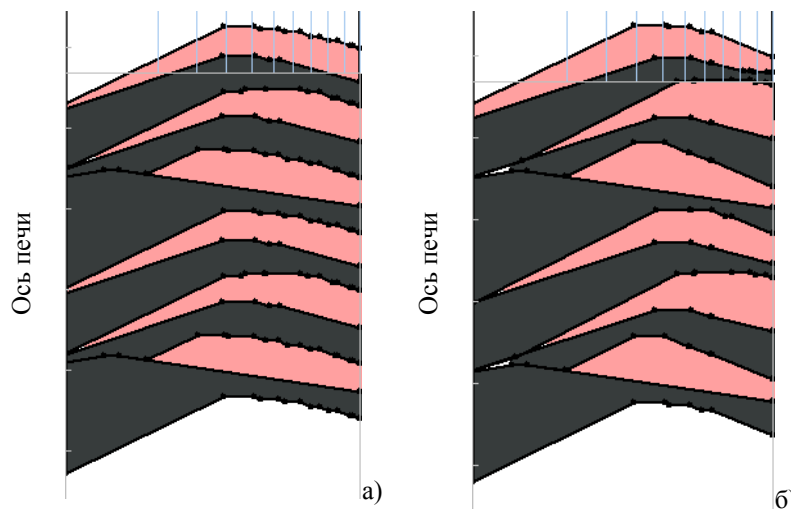


Рис.2. Расчетная структура столба шихтовых материалов для программ загрузки, используемой в 2012 г. (а) и установленной в 2013 г. (б)

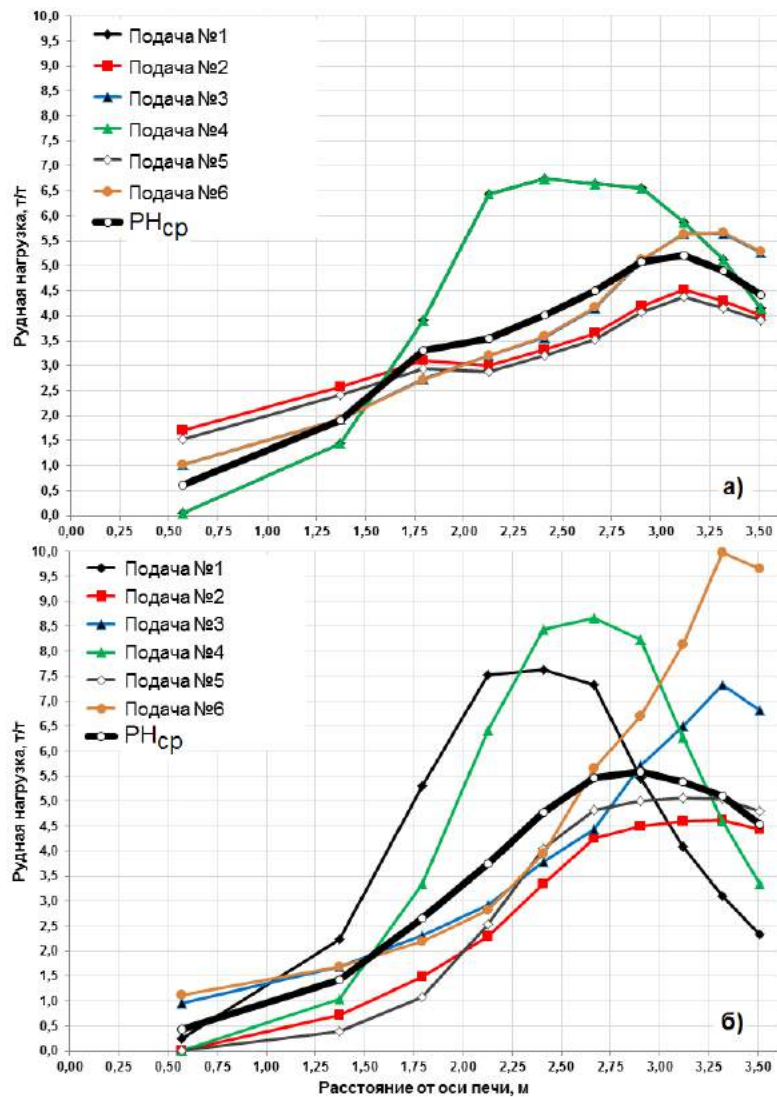


Рис.3. Распределение расчетных рудных нагрузок по радиусу колошника внутри цикла загрузки после выгрузки каждой подачи для программ загрузки, используемой в 2012 г. (а) и установленной в 2013 г. (б)

На первом этапе после изменения программы загрузки работа ДП №3 характеризовалась нестабильным химическим нагревом чугуна с изменением содержания кремния от 0,21 до 1,01 % ($[Si]_{ср}=0,62\%$) и содержанием серы от 0,026 до 0,269 % ($[S]_{ср}=0,072\%$), что может объясняться обновлением коксовой насадки при перестройке столба шихты в печи. После чего сход шихты стал более стабильным без «подстоев» и «обрывов», температура периферийных газов после стабилизации рабочего уровня засыпи (1,3 м) уменьшилась на 65°C (при увеличении в шихте количества горячего агломерата это позволило в дальнейшем продлить срок службы лотка БЗУ). Температура колошникового газа увеличилась незначительно от 295°C до 310°C. После изменения программы загрузки прекратилось интенсивное горение

фурм, стала возможной работа без верхних «подвисаний» с уровнем засыпи 1,3 м, которая сопровождалась относительно стабильным верхним перепадом давления. Для приведения ДП №3 к одинаковым условиям работы до и после изменения программы загрузки был выполнен расчет влияния технологических факторов на удельный расход кокса [16], который показал, что приведенный расход кокса после изменения программы загрузки уменьшился на 2% [4, 17].

Таким образом, разработанная по вышеописанному подходу программа загрузки, как основная, успешно использовалась на ДП №3 с февраля 2013 г. с некоторыми корректировками, направленными на обеспечение развитого центрального газораспределения при изменении сырьевых условий. Также на основании данной программы были разработаны и использовались скорректированные варианты программы загрузки: вариант для раздувки ДП после плановых остановок, отличающийся от основной программы более «раскрытой периферией» (уменьшенными рудными нагрузками в периферийной зоне), а также вариант программы загрузки для повышенного (более 50%) содержания окатышей в шихты, обеспечивающий минимальную их концентрацию в периферийной и центральной зонах колошника.

На основе изложенного в статье подхода, в настоящее время разработаны программы загрузки для условий использования технологии вдувания пылеугольного топлива (ПУТ), которая планируется быть реализованной на ДП №3 ПАО «ЕМЗ» в 2016 г. Основным изменением программы загрузки при использовании ПУТ явилось уменьшение количества рабочих угловых положений лотка БЗУ при выгрузке кокса от пяти до четырех и увеличение от пяти до шести количества рабочих угловых положений при выгрузке порций железосодержащих материалов. Эти изменения обусловлены работой ДП с увеличенной средней рудной нагрузкой при вдувании ПУТ и направлены как на обеспечение достаточной газопроницаемости слоев шихтовых материалов по высоте столба, так и на обеспечение взаимного перетока газов между центральной и периферийной зонами печи.

Использование информации о температуре над поверхностью засыпи шихты для контроля доменной плавки

Для эффективного выбора и оценки режимов загрузки необходима надежная информация о распределении газового потока по радиусу и окружности ДП, которое, как правило, оценивают по показаниям термопар стационарных термобалок (термозондов) и (или) химическому составу газа, получаемого с помощью газоотборных машин [1, 18–20]. В последнее время для оценки распределения газового потока все шире применяются термобалки, которые устанавливаются над поверхностью засыпи шихты в печи по одному или нескольким диаметрам колошника. Важным достоинством термобалок, в отличие от газоотборных машин, является непрерывность измерений, что позволяет использовать получаемую с их помощью информацию для оценки и корректировки режимов загрузки ДП. К главному недостатку термобалок следует отнести получение некорректной информации при понижениях рабочих уровней засыпи вследствие перемешивания газового потока. Это свидетельствует о большей эффективности применения термобалок, особенно для управления радиальным распределением шихтовых материалов на ДП, оборудованных БЗУ, где изменение уровня засыпи не используется в качестве инструмента управления распределением шихты. Для получения достоверных и стабильных показаний термобалки должны располагаться на расстоянии ~ 0,50 м от поверхности засыпи [1]. Как правило, для обеспечения приблизительно равных расстояний от поверхности шихты до термопар по радиусу печи, термобалки устанавливаются под углом наклона к горизонту, предполагая

формирование в доменной печи воронкообразного профиля поверхности засыпи шихты. Однако это требование актуально лишь при формировании поверхности шихты КЗУ и не является необходимым при оснащении ДП БЗУ, программы загрузки для которых предусматривают выгрузку порций кокса в осевую зону ДП.

Оценка распределения РН по информации, получаемой термобалками основана на установленной исследователями взаимосвязи между распределением CO_2 и температурой газов над поверхностью засыпи шихты по радиусу печи, которая выражается обратным видом зависимости [20]. Однако эта взаимосвязь нарушается после выгрузки порции кокса в осевую зону печи и при понижениях рабочего уровня засыпи. Также температуры поверхности шихты зависят от толщины слоя и теплоемкости материалов в кольцевых зонах печи [1]. Следовательно, для принятия управляющих воздействий получение объективной информации об изменении температуры поверхности засыпи шихты должно осуществляться с использованием специальных алгоритмов обработки данных.

Негативной особенностью термобалок, имеющих прямоугольное поперечное сечение составляющее более 200 мм, является искажение потока шихты при его контакте с термобалками. Это приводит к образованию в печи окружной неравномерности шихты [21, 22]. Так, при контакте с балками потока шихты в секторах печи под балками образуются углубления более 0,5 м, это, в свою очередь, приводит к неравномерному распределению шихты и газов по окружности печи. По рекомендации ИЧМ на ДП №3 ПАО «ЕМЗ», после проведения капитального ремонта 3-го разряда в июне 2014 г. были установлены четыре охлаждаемые азотом термобалки отечественного производства с шириной контактной поверхности менее 200 мм. Положительной конструктивной особенностью установленных термобалок, в отличие от конструкций большинства термобалок иностранного производства, является возможность объективного контроля степени развития периферийного газового потока – расстояние от стенки колошника до крайней периферийной термопары составляет 50 мм, а расстояние до второй термопары пристеночной зоны – 310 мм.

В некоторых публикациях [19, 23, 24] встречаются противоречивые сведения о влиянии охлаждения термобалок на их показания. Так, выполненные на ДП Запорожстали [23] исследования по влиянию охлаждения термобалок на их показания путем периодического отключения подачи азота показали отсутствие существенных искажений показаний термопар, что противоречит выводам, изложенным в работе [19]. Согласно исследованиям [24], охлаждение конструкции термобалок оказывает влияние только на показания крайней пристеночной термопары за счет отходящего азота. Данные утверждения требуют проведения дополнительных экспериментальных исследований, направленных на кратковременное отключение хладагента, а для объективной оценки температуры периферийного газового потока необходимо использовать средние значения двух крайних термопар пристеночной зоны ДП. Вместе с тем, использование охлаждения особенно необходимо при работе ДП на горячем агломерате, когда исключена возможность получения объективной информации при работе термобалок без охлаждения.

Для анализа изменения температур, регистрируемых стационарными термобалками, при различных технологических условиях плавки, был выбран период работы ДП №3 с 21.06.2014 г. по 21.07.2014 г. В исследуемом периоде работы ДП в программу загрузки БЗУ корректировки не вносились. Цикл загрузки состоял из 12 порций шихтовых материалов, первая и седьмая порции – кокс, выгружаемый в осевую зону ДП (угловые положения лотка БЗУ – 5-1). Анализ показаний стационарных термобалок показал, что в периодах работы печи со стабильным

Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы

уровнем засыпи распределение температур поверхности шихты соответствовало умеренно развитому центральному газораспределению (рис. 4). Это соответствует положениям, разработанной ранее в ИЧМ инструкции по ведению доменной плавки с использованием информации о температуре поверхности шихты, согласно которой осевой газовый поток следует считать чрезмерно развитым, если температура поверхности шихты в осевой зоне радиусом 1,5–1,7 м превышает температуру в периферийной зоне на 300–350 °С. В рассматриваемом периоде работы ДП №3 температура в осевой зоне превышала температуру в периферийной на 80–160 °С.

Для оценки влияния технико-экономических показателей плавки на характер распределения температуры поверхности засыпи шихты для каждого суток исследуемого периода работы ДП №3 был определен расход приведенного к коксу топлива, учитывающий количество используемого в шихте коксового ореха и количество вдуваемого природного газа. На рис. 4 представлено распределение температур поверхности шихты по диаметрам колошника для двух периодов работы ДП №3 с минимальным (29–30.06.2014 г., рис. 4а) и максимальным (04.07.2014 г., рис. 4б) расходом топлива; в первом периоде расход топлива был на 3,5 % меньше, чем во втором. Как следует из рис. 4, периоду работы ДП с минимальным расходом топлива соответствует температура в оси печи на 128 °С больше, по сравнению с периодом с максимальным расходом топлива. Также периоду, представленному на рис. 4а, соответствует меньшая окружная неравномерность температуры в периферийной зоне, которая ярко выражена во втором периоде (рис. 4б) со стороны третьего газоотвода (ГО-3).

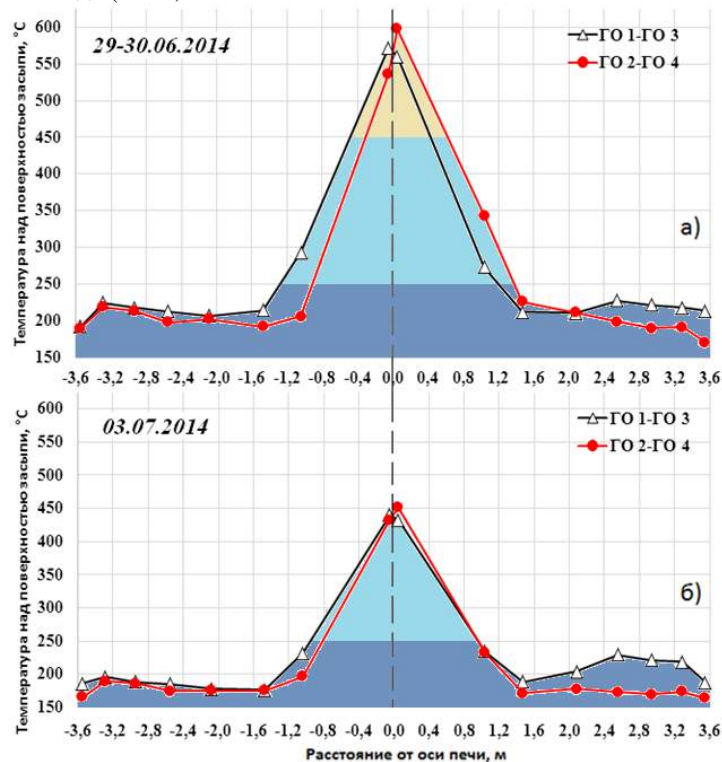


Рис.4. Распределение температуры над поверхностью засыпи шихты по двум измеряемым диаметрам для периодов работы ДП № 3 с минимальным (а) и максимальным (б) расходом топлива

На следующем этапе исследований для оценки распределения интенсивности газового потока по радиусу печи был предложен показатель $K_p = T_c/T_{nф}$, где T_c – температура центральной зоны печи, определяемая по показаниям восьмых по счету от стенки печи термопар, $T_{nф}$ – температура периферийной зоны, определяемая как среднее значение показаний двух пристеночных точек термобалок. Распределение температуры поверхности засыпи по радиусу печи при различных диапазонах показателя K_p представлено на рис. 5. Анализ периодов работы ДП №3 показал, что увеличение показателя K_p до значения 2,7 ед. сопровождалось увеличением суточного производства печи и уменьшением суммарного расхода топлива. При значении показателя K_p больше 2,7 ед. тенденция к увеличению производства печи сохранялась, но при этом имело место незначительное увеличение расхода топлива. Зависимость суточного производства печи и суммарного расхода топлива от показателя K_p представлена на рис. 6. Анализ зависимостей среднесуточных значений показателя K_p с другими параметрами и показателями плавки показал, что, как и в случае с производительностью печи ($r_{x,y} = 0,709$), имеет место связь предложенного показателя с содержанием окатышей в железорудной части шихты ($r_{x,y} = 0,548$), а также с количеством природного газа ($r_{x,y} = 0,734$), с давлением горячего дутья ($r_{x,y} = 0,646$) и с давлением под колошником ($r_{x,y} = 0,573$).

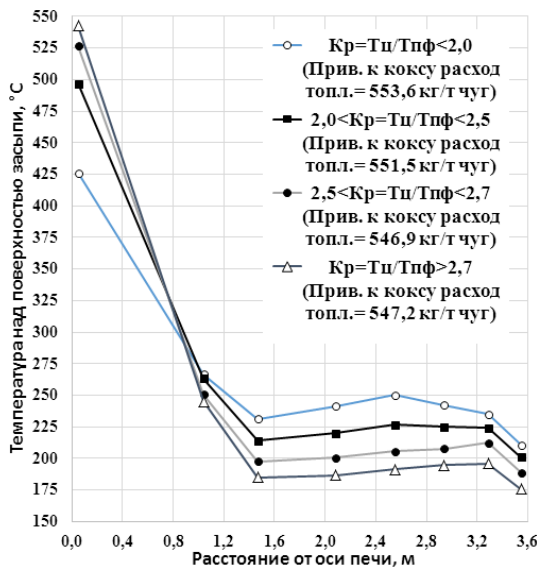


Рис.5. Распределение температур над поверхностью засыпи шихты для периодов работы ДП № 3, соответствующих различным диапазонам изменения показателя K_p

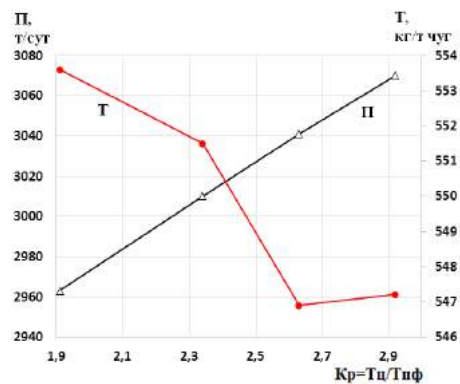


Рис.6. Зависимость суточного производства печи (П) и суммарного расхода топлива (Т) от показателя K_p

Следующим этапом исследований являлась оценка влияния на распределение температуры над поверхностью засыпи содержания окатышей ($\omega_{ок}$) в смеси с агломератом (А+О) и в периферийной зоне (девятая и десятая равные по площади кольцевые зоны) печи (ПФ). Для этого были выбраны пять периодов работы ДП №3 (далее № 1–5). В периоде № 1 $\omega_{ок}$ в (А+О) составляло 48,1 %, в ПФ зоне сечения печи количество окатышей в железорудной смеси, по результатам расчета с помощью разработанных в ИЧМ математических моделей [15, 25], составило, в

Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы

среднем, 42,8 %. В периоде № 2 – 46,0 % (А+О) и 41,4 % (ПФ), в периоде № 3 – 41,0 % (А+О) и 37,4 % (ПФ), в периоде № 4 – 53,2 % (А+О) и 46,2 % (ПФ), в периоде № 5 – 36,0 % (А+О) и 31,5 % (ПФ). Распределение температуры над поверхностью засыпи шихты и содержания окатышей в железосодержащих материалах по радиусу колошника для пяти исследуемых периодов работы ДП №3 приведены на рис. 7. Как следует из результатов, представленных на рисунке, температуры поверхности засыпи шихты тем больше, чем меньше содержание окатышей как в смеси с агломератом, так и в железорудной смеси в ПФ зоне. Так, периоду работы печи с $\omega_{\text{Ок}}$ в ПФ зоне 31,4 % (№ 5) соответствует температура поверхности засыпи в этой зоне – 236 °С, периоду с $\omega_{\text{Ок}}$ в ПФ зоне 37,4 % (№ 3) – 229 °С, периоду с $\omega_{\text{Ок}}$ в ПФ зоне 41,4 % (№ 2) – 221 °С, периоду с $\omega_{\text{Ок}}$ в ПФ зоне 42,8 % (№ 1) – 185 °С и периоду с $\omega_{\text{Ок}}$ в ПФ зоне 46,2 % (№ 4) – 165 °С.

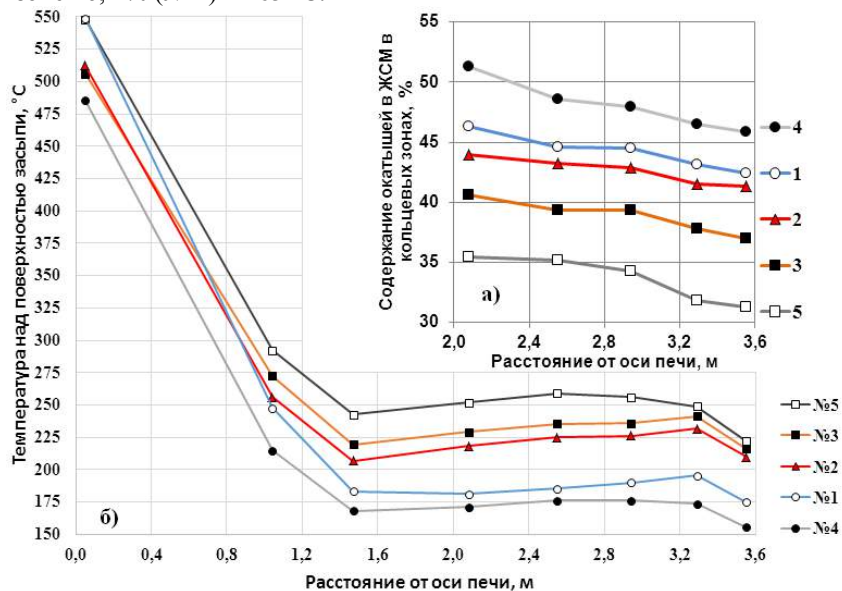


Рис.7. Распределение содержания окатышей в железорудной смеси в кольцевых зонах радиуса колошника (а) и приведенных к одному радиусу температур над поверхностью засыпи шихты (б) для пяти периодов работы ДП №3:

- № 1 – 29.06.2014 $\omega_{\text{Ок}}$ в смеси с агломератом – 48,1 %, в ПФ зоне – 42,8 %;
- № 2 – 01.07.2014 $\omega_{\text{Ок}}$ в смеси с агломератом – 46,0 %, в ПФ зоне – 41,4 %;
- № 3 – 02.07.2014 $\omega_{\text{Ок}}$ в смеси с агломератом – 41,0 %, в ПФ зоне – 37,4 %;
- № 4 – 09.07.2014 $\omega_{\text{Ок}}$ в смеси с агломератом – 53,2 %, в ПФ зоне – 46,2 %;
- № 5 – 16.07.2014 $\omega_{\text{Ок}}$ в смеси с агломератом – 36,0 %, в ПФ зоне – 31,5 %.

Таким образом, установлено, что увеличению (уменьшению) $\omega_{\text{Ок}}$ в ПФ зоне печи на 1 % соответствует уменьшение (увеличение) температуры над поверхностью засыпи шихты на 3–8 °С (рис. 8). Объяснениями полученной зависимости служат как влияние переменного количества горячего агломерата (местного производства), так и увеличение количества FeO в первичном шлаковом расплаве при увеличении содержания окатышей, сопровождающееся большими затратами тепла для восстановления железа, вследствие чего происходят изменения условий плавления и восстановления, приводящие к уменьшению температуры поверхности шихты. Таким образом, информация, получаемая от стационарных термобалок, позволяет контролировать содержание окатышей в периферийной зоне печи, что крайне важно

при формировании защитного гарнисажа в печи. При этом, для установления доли влияния горячего агломерата на температуру газов при переменном содержании окатышей, необходимо проведение дальнейших исследований в условиях использования в шихте агломерата с температурой окружающей среды (привозного).

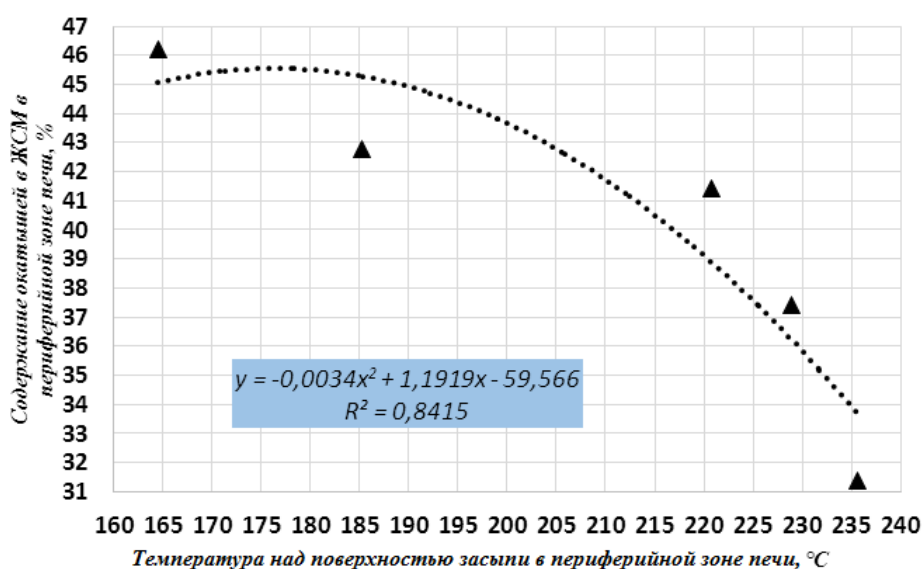


Рис.8. Связь содержания окатышей в железосодержащих материалах (ЖСМ) и температуры над поверхностью засыпи шихты в периферийной зоне печи

Заключение

В условиях нестабильного качества шихтовых материалов предложен новый подход к выбору рациональных программ загрузки БЗУ, основанный на уменьшении количества рабочих угловых положений лотка и смещении от порции к порции условных «гребней» вдоль радиуса колошника. Положительный опыт реализации такой программы загрузки показан на примере ДП №3 ПАО «ЕМЗ», где более трех лет она с некоторыми корректировками использовалась и обеспечивала наряду с другими мероприятиями приемлемые технико-экономические показатели. На основании предложенного подхода были также разработаны и реализованы варианты программы загрузки для раздувочного периода печи и для режимов работы с высоким содержанием окатышей в составе шихты.

Установлены особенности изменения температуры над поверхностью засыпи шихты в зависимости от производительности печи, технико-экономических и газодутьевых показателей, содержания окатышей в пристеночной зоне, что открывает возможность дальнейшего использования информации термобалок для оперативного управления газовым потоком. Информация, получаемая от стационарных термобалок, позволяет контролировать содержание окатышей в периферийной зоне печи, что крайне важно при формировании защитного гарнисажа в печи. Для эффективного использования термобалок при контроле распределения газового потока и последующего обоснованного принятия решений по корректировке режима загрузки предложен показатель распределения интенсивности газового потока K_p .

Библиографический список

1. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / В.И. Большаков – К.: Наук.думка, 2007. – 412 с.
2. Большаков В.И. Теория и практика загрузки доменных печей / В.И. Большаков – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.
3. Особенности применения различных загрузочных устройств на современных доменных печах / [Большаков В.И., Товаровский И.Г., Шутылев Ф.М.] – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2007. – № 9. – С. 24–32.
4. Семенов Ю.С. Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с нестабильным качеством шихтовых материалов / Ю.С. Семенов – «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия», 2013. – № 12. – С. 14–19.
5. The Experience of the Implementation of Modern Blast Furnace Equipped with Bell-Less Top Charging Device under Conditions of Changing Quality of Charge Materials / [V.I. Bolshakov, Yu.S. Semenov, A.M. Kuznetsov] – Metallurgical and Mining Industry, 2013/2, pp. 56–64.
6. Освоение режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в условиях нестабильного качества шихтовых материалов / [Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В., Кузнецов А.М., Зубенко А.В.] – Сборник трудов VI Международного Конгресса по агло-коксо-доменному производству, 20–24 мая 2013. – С. 60–71.
7. Регулирование распределения материалов и газов в доменной печи объемом 2700 м³ / Н.А. Потаничев, В.А. Костров, А.П. Котов, В.Д. Кайлов – Металлург, 1972. – №10. – С. 14–16.
8. Выбор оптимального режима загрузки доменной печи объемом 2000 м³ / А.И. Мазун, М.А. Цейтлин – Сталь, 1968. – №10. – С. 886.
9. Определение массы подачи шихтовых материалов для доменных печей / Ф.Н. Москалина – Вопросы теории и практики производства чугуна (тематический сборник научных трудов), Москва, Металлургия, 1986. – С. 65–69.
10. Исследования на охлажденных доменных печах в Японии / Г.В. Гуденау, М. Сасабе, К. Крайбих – Черная металлургия, № 6–7, 1977, С. 13–17.
11. Влияние массы железорудной подачи на технико-экономические показатели доменной плавки / В.П. Лялюк, В.А. Шеремет, А.К. Тараканов и др. – Бюллетень «Черная металлургия», 2010. – №11. – С. 29–34.
12. Влияние различной крупности кокса на режим работы доменной печи с горном диаметром 7,8 м / Э. Тайхерт, В.Н. Гупта – Черные металлы, 1976. – №14–15. – С. 19–23.
13. Влияние свойств кокса на показатели работы доменной печи / Г. Беер, В. Цишкале – Черные металлы, 1968. – №16. – С. 3–10.
14. Ковшов В.Н., Петренко В.А. Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи, Институт технологии – 1996. – 124 с.
15. Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus / [Yu.S. Semenov, E.I. Shumelchik, V.I. Vishnyakov, A.V. Nasledov, I.Yu. Semion, A.V. Zubenko] – Metallurgist, January 2013, Volume 56, Issue 9-10, pp. 652–657.
16. Товаровский И.Г. Влияние технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи / И.Г. Товаровский – Сб. трудов «Экономия кокса в доменных печах» – М.: Металлургия, 1986. – С. 75–83.

17. Реализация энергосберегающей технологии загрузки современной доменной печи в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях / [В.И. Большаков, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик, В.В. Горупаха, А.Л. Подкорытов, А.В. Зубенко] – *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2014. – № 6 – С. 6–14.
18. Использование информации о температуре над поверхностью засыпи шихты для контроля доменной плавки / [В.И. Большаков, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик, В.В. Горупаха, А.В. Наследов] – *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 2015. – № 3 – С. 2–7.
19. Контроль радиального газораспределения в оборудованных БЗУ доменных печах ММК с помощью многоточечных термозондов / В.М. Паршаков, Р.С. Тахаутдинов, Ю. А. Бодяев и др. – *Сталь*, 2009. – № 10. – С. 16–19.
20. Оценка распределения газового потока по температуре поверхности засыпи / М.Н. Байрака, Н.С. Гринштейн, А.К. Тараканов, Н.М. Можаренко, Б.И. Мирошниченко – *Сталь*, 1986. – № 1. – С. 13–16.
21. Освоение энергосберегающей технологии загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях / В.И. Большаков, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик, В.В. Горупаха, А.В. Наследов, А.М. Кузнецов, А.В. Зубенко – *Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*, 2014. – Вып. 28. – С. 57–80.
22. Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace / [V.I. Bolshakov, Yu.S. Semenov, N.G. Ivancha, V.I. Vishnyakov, E.I. Shumelchik, A.L. Podkorytov, I.Yu. Semion, A.M. Kuznetsov, A.V. Zubenko] – *Metallurgical and Mining Industry*, 2012. – Vol. 4, № 3, pp. 158–165.
23. Работа стационарных охлаждаемых термозондов и компьютерной информационной системы для контроля за распределением температуры по диаметру колошника на доменных печах «Запорожстали» / [А.Л. Брусов, Н.Г. Баланова, Б.Е. Бориславский, В.И. Набока, А.А. Ермоленко, Н.В. Крукас, А.П. Фоменко]– *Производство чугуна на рубеже столетий: труды Vмеждународ. конгр. доменщиков*. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 405–407.
24. Современная автоматизированная система контроля распределения температурного поля газового потока по сечению колошника над уровнем засыпи в доменной печи / [Б.Е. Бориславский, Н.Г. Баланова, А.Б. Бориславский, А.Н. Батищев, О.М. Тищенко, Н.В. Косолап, П.А. Гладкий, А.М. Кузнецов, Н.М. Сапрыкин]– *Сборник трудов VI Международного Конгресса по агло-коксо-доменному производству*, 20–24 мая 2013. – С. 331–341.
25. Разработка математических моделей загрузки многокомпонентных порций шихтовых материалов в бункер бесконусного загрузочного устройства и выгрузки их из бункера / В.И. Большаков, Н.Г. Иванча, В.И. Вишняков – *Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*, 2012. – Вып. 26. – С. 42–51.