

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сентемова В. А. Испытания флотационной технологии повышения качества железных концентратов // Обогащение руд. 2009. № 3. С. 17–21.
2. Деркач В. Г. Специальные методы обогащения полезных ископаемых. — М.: Недра. 1966. — 338 с.
3. Ломовцев Л. А., Нестерова Н. А., Дробченко Л. А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. — М.: Недра. 1979. — 235 с.
4. Кармазин В. В., Кармазин В. И. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. — М.: Недра. 1988. — 304 с.
5. Пелевин А. Е. Обогащение магнетитовых руд в сепараторах бегущего магнитного поля // Изв. вузов: Горный журнал. 2001. № 2. С. 118–122.
6. Справочник по обогащению руд черных металлов / Под ред. С.Ф. Шинкоренко. — М.: Недра. 1980. — 527 с.
7. Евсевич С. Г., Кизевальтер Б. В., Дмитриев А. А. Промышленные испытания тонкого грохочения концентрата на Днепровском горно-обогатительном комбинате // Обогащение руд. 1974. № 4. С. 23–28.
8. Вклад ЗАО «Механообр инжиниринг» в стратегию развития производственного комплекса ОАО «Карельский окатыш» / В. А. Дюбченко, Т. И. Патковская и др. // Там же. 2010. № 1. С. 36–40.

## Аглодоменное производство

УДК 669.162

### ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЗАГРУЗКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ, ОБОРУДОВАННОЙ БЗУ, ДЛЯ УСЛОВИЙ РАБОТЫ С МАЛОЙ МАССОЙ ПОДАЧИ И С НЕСТАБИЛЬНЫМ КАЧЕСТВОМ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ\*

Ю. С. СЕМЁНОВ, канд. техн. наук  
(Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины)

Важным направлением повышения эффективности работы доменных печей (ДП) является совершенствование режимов загрузки шихтовых материалов и рациональное их распределение по радиусу и окружности колошника. По современным представлениям уровень технико-экономических показателей работы ДП в значительной мере определяется эффективным формированием столба шихты и газового потока. Этому способствует применение 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 Институте черной металлургии (ИЧМ) им. З.И. Некрасова НАН Украины проводятся работы по освоению ДП в основном большого объема (более 2000 м<sup>3</sup>), оборудованных БЗУ, и выбору рациональных программ загрузки [1]. Как показы-

вает опыт освоения программ загрузки печей, оборудованных БЗУ, традиционно используют угловые положения лотка 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3 (9–3) для выгрузки железосодержащих порций, 8–4 — для выгрузки порций кокса, 4–1 — для выгрузки порций осевого кокса с заданным неравномерным распределением шихтовых материалов по рабочим угловым положениям лотка [3]. Неравномерное распределение позволяет без изменения структуры программы загрузки оперативно изменять рудные нагрузки (РН) и (или) объемы материалов в зонах, где ход ДП требует такого изменения [1, 3]. При таком формировании программ загрузки обеспечивается укладка материалов практически по всему радиусу колошника с минимальным перераспределением шихты вдоль радиуса.

На основании этого опыта были разработаны и реализованы на ДП № 3 ПАО «Енакиевский металлургический завод» (ЕМЗ) программы загрузки после ее введения в эксплуатацию в октябре 2011 г. [4, 5]. Целью используемых на ДП № 3 программ загрузки являлось обеспечение стабильного хода печи и высоких технико-эконо-

\* Работа выполнена под руководством академика НАН Украины В.И. Большакова.

мических показателей доменной плавки. До ухудшения качества шихтовых материалов на ДП № 3 были достигнуты высокие показатели плавки [4, 5]. В 2012 г. после ухудшения качества и стабильности шихтовых материалов решение поставленной задачи в полном объеме было затруднено. Помимо этого обеспечение стабильного хода плавки осложнялось также отсутствием возможности использования промывочных материалов и традиционной в сложившихся условиях работой ДП № 3 с малой величиной подачи и низким уровнем засыпи (меньше 2,5 м). Масса коксовых порций в этих условиях составляла 7–8 т (при максимально возможной 10,5 т), что соответствовало толщине слоя кокса в среднем 0,4 м.

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 др. [6–10]. Причем все исследования были выполнены на ДП, оборудованных КЗУ. 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 РН и объемов шихтовых материалов по радиусу печи. Однако 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 °С и уменьшению содержания  $\text{CO}_2$  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. Следовательно, выбор программ загрузки должен учитывать существующий на том или ином комбинате подход тех-

нологического персонала к выбору массы подачи.

По мнению зарубежных исследователей, эффективная работа печи обеспечивается при образованной на колошнике толщине слоев кокса и железосодержащих материалов не менее 0,5 м. Особенностью реализованных на ДП № 3 в 2011–2012 гг. программ загрузки являлось использование шести и восьми угловых положений лотка БЗУ при выгрузке порций кокса, семи и восьми угловых положений лотка при выгрузке железосодержащих порций, что обеспечивало распределение материалов практически по всему радиусу колошника. В совокупности с этим работа ДП № 3 на малых подачах способствовала образованию в печи слоев толщиной 0,40 м и менее. С учетом установленного немецкими исследователями эффекта проникновения железосодержащих материалов при выгрузке из БЗУ на 0,15 м в кокс [11, 12] образование слоев указанной толщины способствовало еще большему уменьшению газопроницаемости за счет увеличения сопротивления пограничного слоя [13].

Известно [1], что начальные и конечные позиции распределителя, в которые выгружаются части порции, можно смещать по радиусу в заданной последовательности и в конечном итоге формировать необходимый профиль засыпи (по объему частей порций) и заданное распределение РН по радиусу колошника (по массе частей порций). Смещая в цикле загрузки каждую первую позицию при выгрузке следующих порций железосодержащих материалов сначала к оси, а затем к периферии, в столбе шихты можно образовать на периферии достаточно значительное по высоте коксовое кольцо (в разрезе “журавлиный клин” из железосодержащих материалов). При этом динамика образования столба шихты в рамках цикла загрузки, а именно переменная РН при формировании столба, создает благоприятные условия для более полного использования тепловой энергии газового потока [1].

В связи с особенностями работы ДП № 3 в условиях низкого качества кокса был пересмотрен подход к выбору рациональных программ загрузки, способствующих стабилизации хода печи. А необходимость изменения программы загрузки на ДП № 3 в начале 2013 г. была также обусловлена и интенсивным горением фурм, сопровождающимся высоким расходом кокса по причине сохранявшегося, как и во второй половине 2012 г., нестабильного низкого его качества [показатель горячей прочности кокса (CSR) уменьшился с 43,41 до 41,04 % и показатель ре-

акционной способности (CRI) увеличился с 38,18 до 40,58 %].

Особенностью предложенной для реализации на ДП № 3 в 2013 г. программы загрузки явилось уменьшение числа рабочих угловых положений лотка БЗУ при выгрузке порций с 6–8 до 5. Это позволило увеличить толщину слоев шихтовых материалов на загружаемых участках радиуса печи. Также в предложенной программе загрузки каждая последующая порция цикла загрузки смещает условный “гребень” шихтовых материалов относительно условного “гребня”, сформированного выгрузкой предыдущей порции (по принципу “журавлиного клина”), что направлено на изменение направления движения газового потока. Кроме того, использование при выгрузке порции меньшего числа угловых положений лотка БЗУ увеличивает точность позиционирования лотка и дозирования шихтовых материалов в заданном угловом положении, что особенно актуально при работе на малых подачах.

Для анализа программ загрузки и оценки получаемого с их использованием распределения шихтовых материалов по радиусу печи используют показатели распределения — объемы и РН за цикл загрузки печи в десяти равных по площади зонах колошника [1, 2]. Однако заданное распределение этих показателей по радиусу печи за цикл загрузки можно обеспечить множеством вариантов программ загрузки. Для анализа используемых программ загрузки с целью выявления их отличительных признаков и особенностей воспользуемся следующими показателями программы загрузки:

1) центр тяжести 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, относительно которого концентрируется масса порции шихтовых материалов. Показатель центра тяжести каждой порции определяется согласно следующему выражению:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{10} iMi}{\sum_{i=1}^{10} Mi},$$

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

2) число 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 с возможностью последующей оценки толщины слоев шихтовых материалов по всему радиусу колошника или на отдельных его участках;

3) 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 двух программ загрузки: используемой в 2012 г. и реализованной в 2013 г.

Для программы загрузки, используемой в 2012 г., показатели центра тяжести порций в цикле загрузки для порций осевого кокса составили  $C_k = 3,0$ , 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 центра тяжести порций изменяются в более широком диапазоне: 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 числа рабочих угловых положений лотка в цикле загрузки для программы загрузки, используемой в 2012 г., 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 предположительно увеличить газопроницаемость за счет уменьше-

ния 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. Как видно из рис. 1, используемая в 2012 г. программа загрузки практически не обеспечивает 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 своих положениях 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 [14].

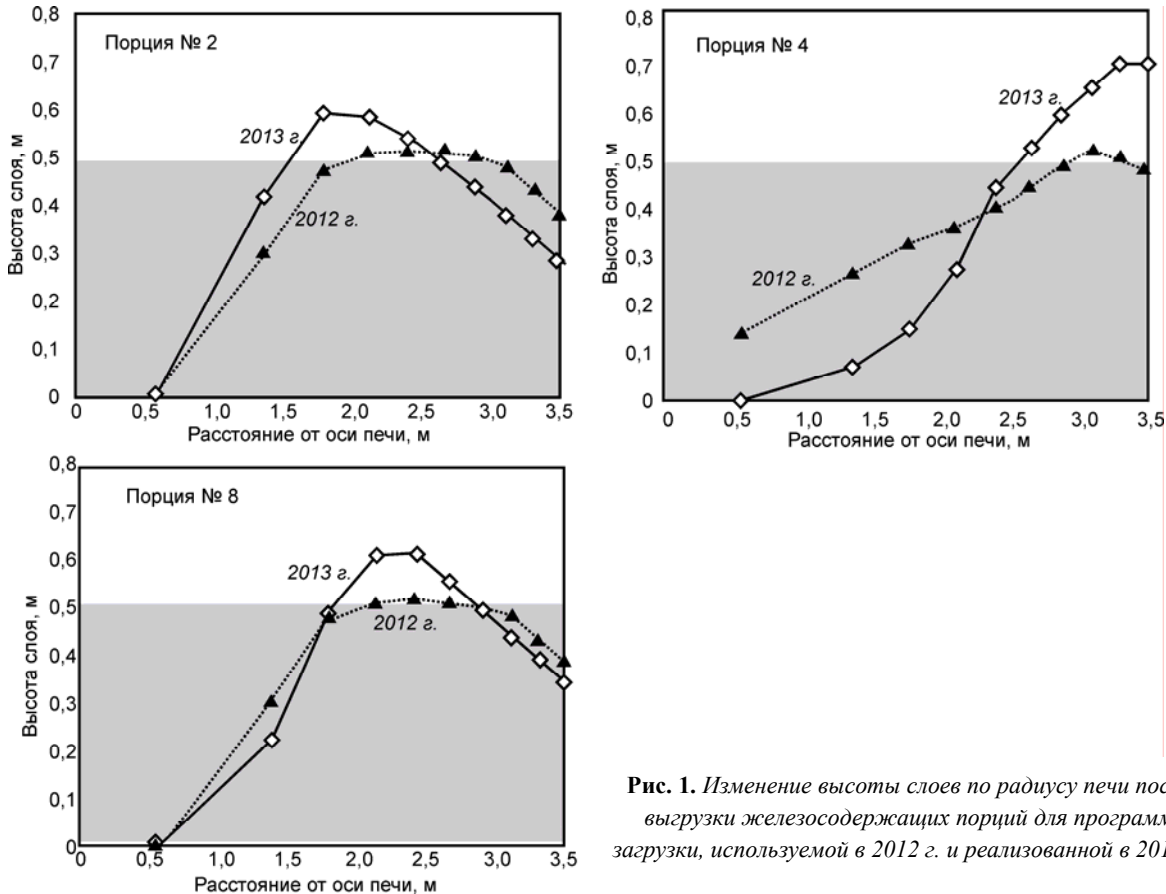


Рис. 1. Изменение высоты слоев по радиусу печи после выгрузки железосодержащих порций для программ загрузки, используемой в 2012 г. и реализованной в 2013 г.

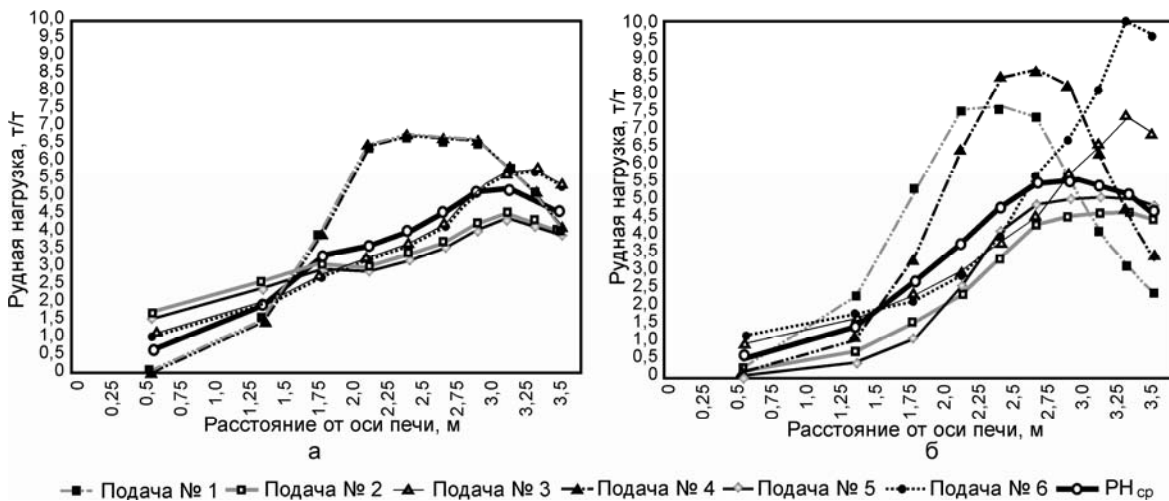


Рис. 2. Распределение расчетных рудных нагрузок по радиусу колошника внутри цикла загрузки после выгрузки каждой подачи для программ загрузки, используемой в 2012 г. (а) и реализованной в 2013 г. (б)

Анализ распределения расчетных РН в десяти равных по площади зонах колошника внутри цикла загрузки после выгрузки каждой подачи для программ загрузки, используемой в 2012 г. (рис. 2, а) и реализованной в 2013 г. (см. рис. 2, б), показал, что рекомендуемая в 2013 г. программа загрузки характеризуется большим разбросом РН в каждой зоне колошника от подачи к подаче. Особенно характерна периферийная зона, где разброс РН для программы загрузки, реализованной в 2013 г., составляет от 2,35 до 9,66 т/т ( $\sigma_{РН} = 2,64$  т/т) по сравнению с разбросом РН для программы загрузки, используемой в 2012 г., от 3,51 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.

После изменения на ДП № 3 программы загрузки следует выделить основные положительные моменты. Сход шихты стал стабильным без “подстоев” и “обрывов”, температура периферийных газов после стабилизации рабочего уровня засыпи (1,3 м) уменьшилась на 65 °С, с 640 до 575 °С. При увеличении в шихте количества горячего агломерата это позволило продлить срок службы лотка БЗУ. Температура колошникового газа увеличилась незначительно: с 295 до 310 °С. Распределение по радиусу печи температур поверхности засыпи шихты по показаниям стационарных термобалок характеризовалось стабильным центральным газораспределением и постепенным уменьшением температур в промежуточной и периферийной зонах печи. Температура в центральной зоне печи увеличилась на 48 °С и уменьшилась в перифе-

рийной и в промежуточной зонах в среднем на 18 °С (рис. 3). После изменения программы загрузки прекратилось интенсивное горение фурм, после переходного периода стала возможной работа без верхних “подвисаний” с уровнем засыпи 1,3 м, которая сопровождалась относительно стабильным верхним перепадом давления, составлявшим около 0,18 ати. Для приведения ДП № 3 к одинаковым условиям работы до и после изменения программы загрузки был выполнен расчет влияния технологических факторов на удельный расход кокса [15], который показал, что приведенный расход кокса после изменения программы загрузки уменьшился на 2 %.

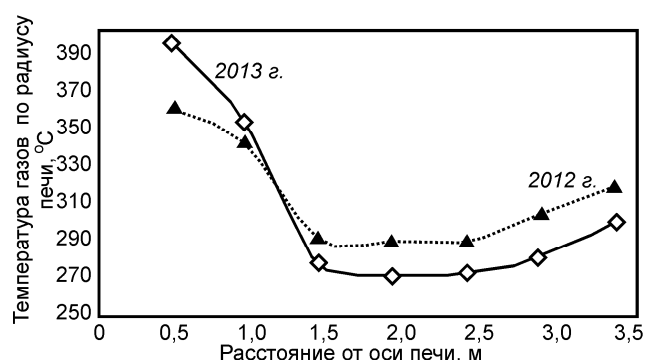


Рис. 3. Распределение температур над поверхностью засыпи по радиусу печи до и после изменения программы загрузки

Таким образом, в условиях нестабильного качества шихтовых материалов при работе ДП с малой массой подачи предложен подход к выбору рациональных программ загрузки БЗУ, основанный на уменьшении числа рабочих угловых положений лотка и смещении от порции к порции центра тяжести порции вдоль радиуса колошника. Положительный опыт реализации такой программы загрузки показан на примере ДП № 3 ПАО ЕМЗ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков В. И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. — Киев: Наукова думка. 2007. — 412 с.
2. Большаков В. И. Теория и практика загрузки доменных печей. — М.: Металлургия. 1990. — 256 с.
3. Большаков В. И., Товаровский И. Г., Шутылев Ф. М. Особенности применения различных загрузочных устройств на современных доменных печах // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. 2007. № 9. С. 24–32.
4. Большаков В. И., Семенов Ю. С., Кузнецов А. М. Опыт освоения современной доменной печи, оборудованной БЗУ, в условиях изменяющегося качества шихтовых материалов // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. № 2. С. 82–86.
5. Освоение режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в условиях нестабильного качества шихтовых материалов / В. И. Большаков, Ю. С. Семенов, Е. И. Шумельчик и др. // Сб. трудов VI Междунар. конгресса по аглококс-доменному производству. 20–24 мая 2013. С. 60–71.

6. Регулирование распределения материалов и газов в доменной печи объемом 2700 м<sup>3</sup> / Н. А. Потаничев, В. А. Костров, А. П. Котов, В. Д. Кайлов // *Металлург.* 1972. № 10. С. 14–16.
7. Мазун А. И., Цейтлин М. А. Выбор оптимального режима загрузки доменной печи объемом 2000 м<sup>3</sup> // *Сталь.* 1968. № 10. С. 886.
8. Москалина Ф. Н. Определение массы подачи шихтовых материалов для доменных печей: Тематич. сб. научн. трудов “Вопросы теории и практики производства чугуна”. — М.: *Металлургия.* 1986. С. 65–69.
9. Гуденау Г. В., Сасабе М., Крайбих К. Исследования на охлажденных доменных печах в Японии // *Черная металлургия.* 1977. № 6–7. С. 13–17.
10. Влияние массы железорудной подачи на технико-экономические показатели доменной плавки / В. П. Лялюк, В. А. Шеремет, А. К. Тараканов и др. // *Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”.* 2010. № 11. С. 29–34.
11. Тайхерт Э., Гупта В. Н. Влияние различной крупности кокса на режим работы доменной печи с горном диаметром 7,8 м // *Черные металлы.* 1976. № 14–15. С. 19–23.
12. Беер Г., Цишкале В. Влияние свойств кокса на показатели работы доменной печи // Там же. 1968. № 16. С. 3–10.
13. Ковшов В. Н., Петренко В. А. Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи. — Днепропетровск: *Институт технологии.* 1996. — 124 с.
14. Модельная система выбора и корректировки программ загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ / Ю. С. Семенов, Е. И. Шумельчик, В. И. Вишняков и др. // *Металлург.* 2012. № 9. С. 36–40.
15. Волков Ю. П., Шпарбер Л. Я., Гусаров А. К. *Технолог-доменщик.* — М.: *Металлургия.* 1986. — 263 с.

УДК 622.785

## ОСНОВЫ ТЕОРИИ НЕРАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА И СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ОФЛЮСОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ АГЛОМЕРАТОВ

СООБЩЕНИЕ 5

### СТРУКТУРНАЯ КОМПОНЕНТА СТЕПЕНИ НЕРАВНОВЕСНОСТИ ОФЛЮСОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ АГЛОМЕРАТОВ, СФОРМИРОВАННАЯ ФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА

*В. П. ПУЗАНОВ, В. А. КОБЕЛЕВ (ОАО “Уральский институт металлов”)*

Данная статья является развитием работы [1], в которой было сделано допущение о капиллярном характере взаимодействия частиц при формировании прочности гранул окомкованной шихты. При этом постоянной была принята величина пористости гранул  $\varepsilon_r$ , в связи с чем капиллярная прочность гранул  $\sigma_{\text{кап}}$  из тонкоизмельченных материалов была сведена к простейшему соотношению  $\sigma_{\text{кап}} = kS_0$ , где  $S_0$  — удельная поверхность частиц. Кроме того, была

сделана замена физического уравнения по определению среднего диаметра гранул эквивалентным ему эмпирическим выражением, включающим температурно-временные характеристики спекаемого слоя, контролирующие линейные размеры гранул. В результате было получено непротиворечивое, достаточно полное и точное уравнение для расчета степени отклонения фазового состава агломерата от состояния равновесия:

$$\delta_{\text{откл}} = C - \left( \frac{A_{\text{xp}}}{d_{\text{хар}}} - A_{\text{фп}} K_{\text{фп}} \right) + BM_{\text{осн}}^{\text{мод}} = 0,037 - 13,13/d_{\text{хар}} + 0,000149K_{\text{фп}} + 0,45M_{\text{осн}}^{\text{мод}}, \quad \text{доли ед. } (R = 0,870). \quad (1)$$