

УДК 669.162.2

А.Л. Брусов

## ВОЗМОЖНОСТЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ОКРУЖНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ЛОТКОВЫМ ЗАГРУЗОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Рассмотрена возможность и теоретические предпосылки для создания автоматизированной системы управления окружным распределением с использованием эффекта «незамкнутого витка». Приведены результаты аналитических и экспериментальных исследований распределения шихты по окружности колошника. Описан предлагаемый алгоритм управления.

Ключевые слова: доменная печь, лотковое загрузочное устройство, окружное распределение шихты, автоматизированная коррекция

### Постановка задачи и анализ публикаций

Распределение шихты в доменной печи, а это основная задача загрузочного устройства, принято разделять на радиальное и окружное распределение. Двухконусное загрузочное устройство, состоящее из аппарата Пари (пары конус-чаша) и вращающего распределителя Мак-Ки, к середине XX-ого века использовали для загрузки практических всех доменных печей мира. Естественно, что распределению шихты по окружности колошника и управлению окружным распределением газового потока двухконусным устройством, доменщики уделяли много внимания. В отечественной литературе эти вопросы подробно описаны в трудах В.П. Тарасова [1, 2] и других исследователей.

Общепринятое требование к качеству окружного распределения: максимально равномерное распределение шихты, одинаковое по любому радиусу. А значит, от загрузочного устройства требуется равномерная загрузка шихты по окружности и, при необходимости, возможность выровнять газовый поток на колошнике. Качественное распределение характеризует [1] минимальный коэффициент окружной неравномерности ( $\varphi$ ):

$$\varphi = (P_{\max} - P_{\min}) / P_{\text{cp}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$ ,  $P_{\text{cp}}$  – соответственно максимальная, минимальная и средняя масса шихтового материала в секторах, кг.

В конусных устройствах окружным распределением управляют при помощи вращающего распределителя шихты (ВРШ). Суть управления сводится к следующему. Каждый скип шихты, перед тем как выгрузить, ВРШ поворачивает на заданный программой угол (станцию). Максимум шихты (гребень) при выгрузке с конуса попадает в расположенный под ним сектор колошника. Если максимум каждого скипа выгружать в заданный для него сектор, то при большом количестве подач, материал равномерно распределится по окружности. Если газовый поток неравномерный, то, изме-

нив режим работы ВРШ по команде технолога, в заданный сектор выгружают: или рудный, или коксовый гребень, или максимум мелочи. Неоднократно предпринимались попытки автоматизировать этот процесс и создать АСУ ВРШ [3]. По отзывам технологов-практиков, основная проблема в изменении положения гребня скипа шихты в процессе эксплуатации и некорректном определении автоматикой сектора с максимальным отклонением температуры, а значит и неадекватная реакция, то есть изменение программы работы ВРШ. Публикации по окружному распределению подтверждают, что эта проблема по-прежнему актуальна.

В 70-х годах широкое распространение получили бесконусные загрузочные устройства (БЗУ) с вращающимся лотком. Основное преимущество лоткового загрузочного устройства в изменении качества радиального распределения [4], но свои особенности имеет и окружное распределение. Одна из причин окружной неравномерности – изменение расхода шихты в начале и конце ссыпания порции, наличие так называемых «незамкнутых витков». Такая окружная неравномерность (её называют неориентированной) зависит от числа витков, координат начала и конца ссыпания, не имеет жёсткой привязки к окружности колошника, и значительно уменьшается при сдвиге начала высыпания каждой последующей порции. Под витком здесь и далее подразумевается слой шихтового материала на колошнике, образующийся за один оборот вращающегося распределительного лотка.

### **Цель исследований**

Детально изучить причины возникновения окружной неравномерности при загрузке шихты лотковым загрузочным устройством и разработать методику автоматизированного управления распределением газового потока окружности колошника доменной печи.

### **Методика исследований**

Чтобы выявить особенности возникновения неориентированной неравномерности, на модели колошника в масштабе 1:5, разделенной на восемь секторов, были проведены эксперименты по определению влияния частоты вращения на окружную неравномерность [5]. Координаты начала и конца ссыпания, фиксировали бесконтактными датчиками на основе фоторезисторов типа ФСК-1, расположенными по окружности модели. Для характеристики распределения использовали коэффициент окружной неравномерности ( $\varphi$ ). Результаты экспериментов приведены в зависимости от числа витков и представлены на рис. 1 (точки).

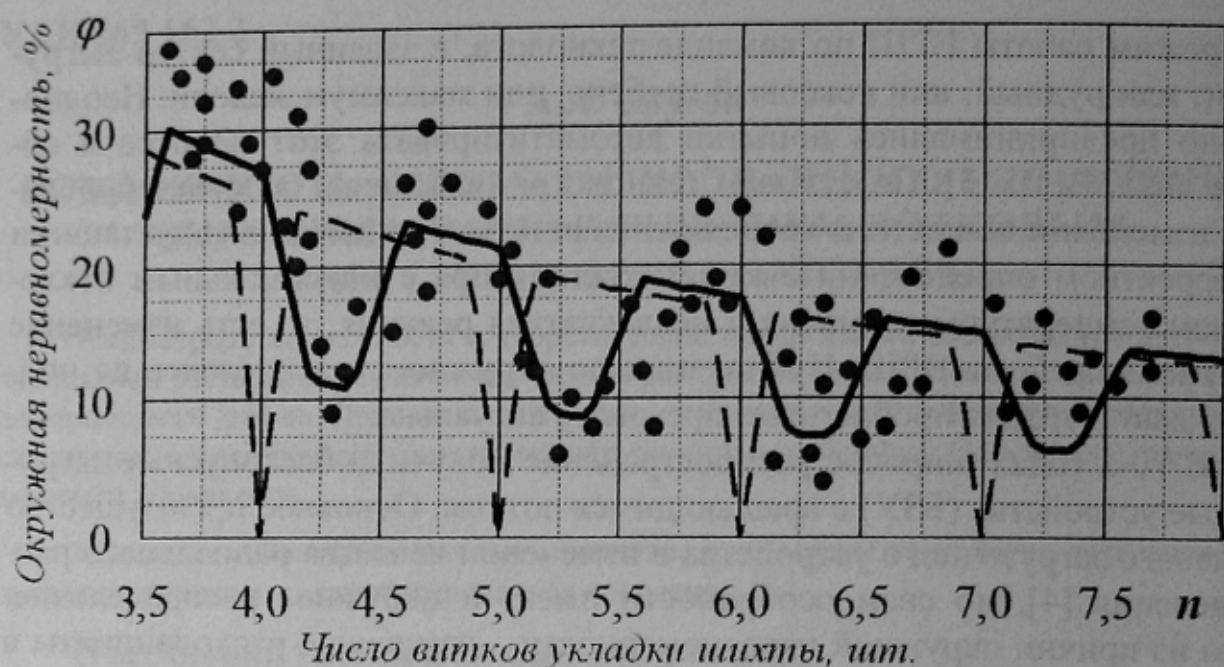


Рисунок 1 – Влияние числа витков укладки шихты ( $n$ ) на неравномерность окружного распределения ( $\varphi$ ): экспериментальные данные (точки) и расчётные зависимости (пунктирная и сплошная линии)

Изначально предполагалось, что количество витков укладки связано с окружной неравномерностью простым соотношением ( $\varphi = 1/n \cdot 100\%$ ), которое следует из загрузки в часть секторов лишнего витка шихты. Так при числе витков равном ( $n = 5,3$ ) как минимум в один сектор из восьми попадёт 6 витков, и как минимум в пять секторов – по 5 витков. То есть окружная неравномерность должна составлять:  $\varphi = (6 - 5)/5,3 \cdot 100\% \approx 19\%$  (пунктир на рис. 1). Фактически получилось в два раза меньше – от 7% до 11%, а максимальная неравномерность (по данным опыта) была при целом количестве витков, что полностью опровергает это предположение.

Из экспериментальных данных видно, что в целом закономерность «больше витков – меньше неравномерность» соблюдается, а максимальные значения численно совпадают с прогнозом. Но при значениях дробной части числа витков от 0,2 до 0,4, неравномерность уменьшается в два раза, что не может быть ошибкой опытов ( $\pm 2\%$ ). Значит, очевидное, но упрощенное представление о замыкании витков выраженное соотношением ( $\varphi = 1/n \cdot 100\%$ ) не согласуется с экспериментальными данными, даже с учётом укладки «хвостов» в один сектор (пунктир на рис. 1). Такой взгляд приводит к неверным выводам и рекомендациям. Например, установив время выгрузки порции из бункера, кратное времени одного оборота, мы «замкнув» витки, фактически получаем максимальную неравномерность.

Для теоретического обоснования экспериментально полученных зависимостей разработана математическая модель, основанная на предположении, что массовый расход шихты из бункера сначала линейно возрастет до

величины  $q$  за время  $\tau_n$ , после чего остается постоянным, а перед окончанием высыпания линейно убывает до нуля за время  $\tau_k$ .

Графическое изображение укладки одной порции шихты на поверхности колошника приведено на рис. 2. Обозначим:  $n$  – число витков укладки шихты от начала до полного окончания высыпания порции (за время  $t$ ),  $N = [n]$  – число целых витков, а  $\{n\} = n - N$  – дробная часть этого числа;  $\alpha_n = \alpha_2 - \alpha_1$  – угол сектора витка, образующийся за время  $\tau_n$ , в долях оборота;  $\alpha_k = \alpha_4 - \alpha_3$  – угол сектора витка, образующийся за время  $\tau_k$ , в долях оборота;  $Q$  – масса материала в порции, кг;  $q_{cp}$ ,  $q_{max}$  и  $q_{min}$  – средняя, максимальная и минимальная масса шихты в секторе, отнесённая к величине его центрального угла, когда последний стремится к нулю, кг.

Формулы зависимости окружной неравномерности от числа витков приведены в статье [5]. Пример полученной расчетной зависимости (уточнено отношение  $\tau_H/\tau_K$ ) приведен на рис. 1 (сплошная линия). Математическая модель адекватно описывает результаты эксперимента. Из графика следует, что окружная неравномерность с увеличением числа витков имеет тенденцию к уменьшению, однако и при одинаковом целом числе витков, в зависимости от их «замкнутости», то есть величины дробной части, неравномерность распределения изменяется значительно: в  $\alpha_k/(\alpha_k - \alpha_n)$  раз. Значение минимальной неравномерности тем меньше, чем ближе отношение  $\alpha_n/\alpha_k$  к единице, но интервал минимальных значений при этом тоже уменьшается, а значит труднее подобрать время выгрузки порции.

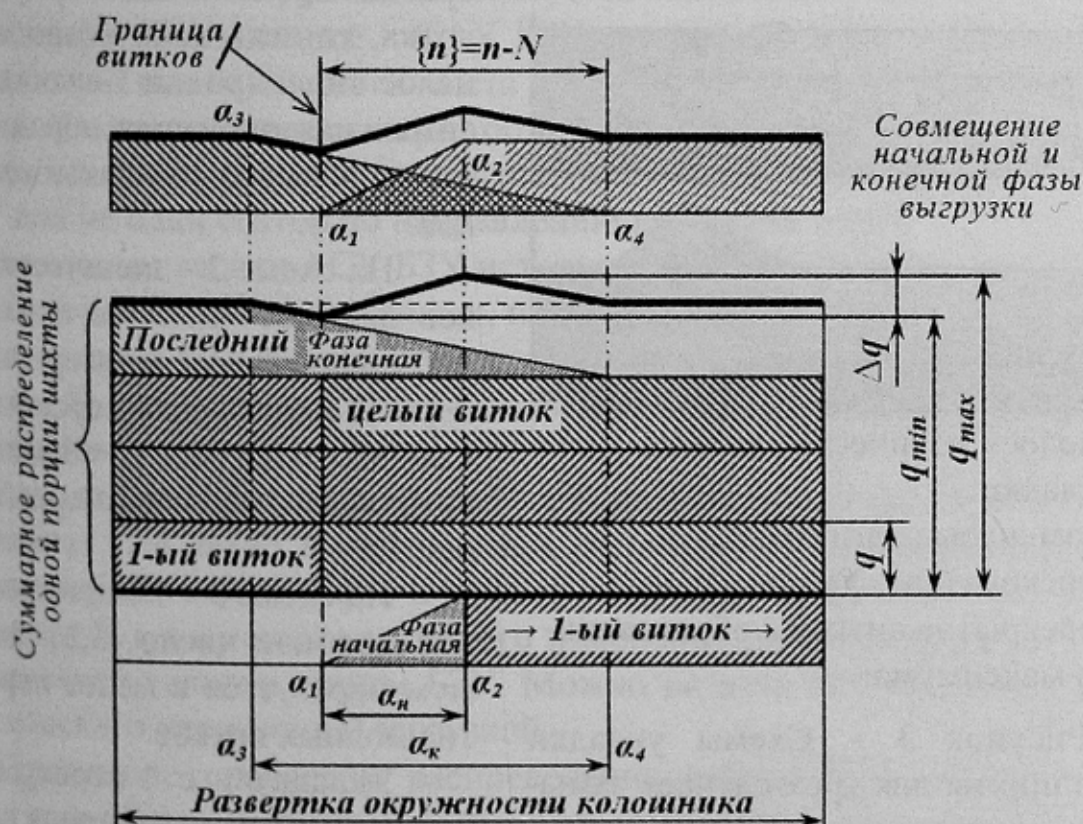


Рисунок 2 - Графическое изображение укладки (слева направо и снизу вверх) одной порции шихты на поверхности колошника.

Предпосылки для управления окружным распределением появились как результат детального изучения замыкания витков и выгрузки сыпучих шихтовых материалов из бункера. Многочисленными исследованиями на моделях [6], а также на действующей доменной печи установлено, что процесс выгрузки шихты из бункера можно разделить на три периода:

- ссыпание начинается при раскрытии затвора на  $5^\circ$ , затем расход шихты линейно увеличивается до остановки затвора в рабочем положении;
- во втором периоде выгрузки (основная часть времени) ссыпание стабильно, существенных отклонений от среднего расхода нет ( $\pm 10\%$ );
- ссыпание остатков шихты длится несколько секунд, но большая часть ссыпается за 1 с, а расход равномерно убывает от среднего до нуля.

Особенностями расхода в начале и конце ссыпания можно было бы пренебречь, но за 1 секунду лоток успевает повернуться на  $48^\circ$  и уложить

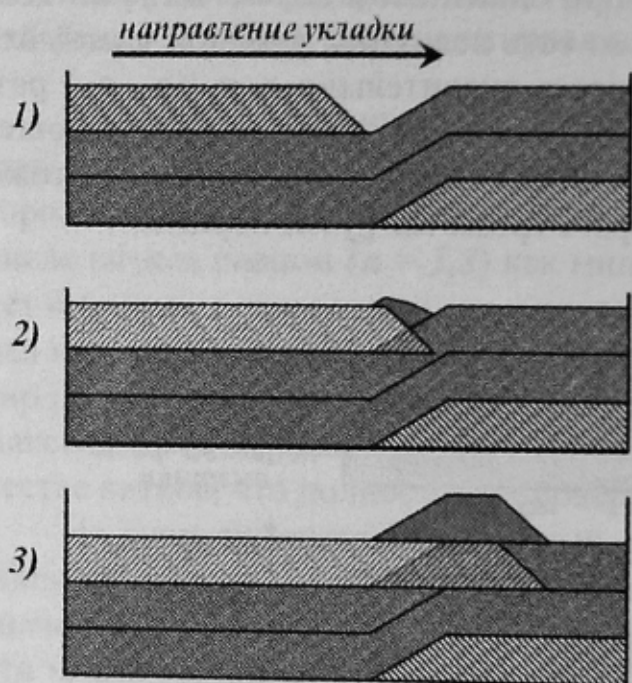
слой переменной толщины, который является причиной окружной неравномерности. Возможные варианты укладки показаны на рис. 3.

На схеме 1 – время выгрузки кратно времени одного оборота лотка, то есть количество витков целое число (ровно 3 витка). Максимальная окружная неравномерность в месте «замыкания» витков.

На схеме 2 – количество витков дробное число (в примере – 3,12). Начальный и завершающий периоды друг друга перекрывают. Способ загрузки – «Замкнутый виток». Наименьшая неравномерность.

На схеме 3 – количество витков дробное число (3,3). Максимум образуется в месте перекрытия полных витков.

Укладку с перекрытием, большим, чем суммарная длина «хвостов», можно использовать



- 1) «целое» количество витков укладки;
- 2) «замкнутые» витки с перекрытием «хвостов»;
- 3) перекрытие витков с образованием максимума.

Рисунок 3 – Схемы укладки слоев шихты для трех случаев замыкания витков (чёрным – конечный результат перекрытия слоев)

для управления окружным распределением.

Результаты окружного распределения в трех примерах отличаются только временем выгрузки шихты из бункера. Следовательно, управляя временем выгрузки шихты из бункера можно управлять её окружным распределением: можно существенно снизить неравномерность, переходя от распространенной укладки по схеме 1 к укладке по схеме 2 с «замкнутыми витками»; можно корректировать распределение, укладывая максимум (минимум) порции в выбранный сектор колошника по схеме 3.

Время выгрузки порции зависит от многих факторов, но управляют им, только изменяя угол раскрытия шихтового затвора. Экспериментально доказано, что задача определения и регулировки времени выгрузки бункера, с достаточной для управления окружным распределением точностью, сложная, но вполне реализуемая практически. Дискретность задания и фактическая точность отработки угла раскрытия шихтового затвора ( $\pm 0,2^\circ$ ) обеспечивает требуемую точность времени выгрузки – 1%, а конструкция бункера и процесс ссыпания шихты из него – требуемое постоянство ( $\pm 1\%$ ). Это значит, что есть предпосылки для практической реализации управления окружным распределением в автоматизированном режиме. Учтём также, что в лотковых БЗУ нет накопления между шихтовым затвором и поверхностью засыпи. Шихта, выгружаемая из бункера, укладывается на поверхность колошника, но первые куски шихты достигают поверхности при повороте лотка  $\approx 60^\circ$  и со смещением примерно на этот же угол.

В управлении загрузкой используется «начальный сектор» (гаражное положение) – это заданное в САУ БЗУ положение лотка по окружности, относительно оси наклонного моста в момент начала открытия шихтового затвора. Их задано шесть: через  $60^\circ$ . Таким образом, фактическое начало укладки шихты смещается относительно заданного «начального сектора» на  $60^\circ$  или на один сектор по направлению вращения лотка.

Реализация задачи АСУ БЗУ исторически и практически складывается из решения двух взаимосвязанных, но отдельных задач: 1) загрузка шихтовых материалов БЗУ в доменную печь в соответствии с заданным циклом загрузки; 2) оптимизация распределения шихты на колошнике, используя корректировку режима загрузки.

Одна задача – загрузка, вторая – распределение. Загрузка шихты (первая задача) уже давно выполняется в автоматическом режиме для загрузочных устройств всех типов и на всех печах. Для лоткового БЗУ её решение сводится к возможности гибкого изменения режима загрузки с учетом особенностей укладки шихты БЗУ. Можно назвать её САУ (системой автоматического управления) загрузкой.

Управление процессом распределения шихты БЗУ (вторая задача) нельзя полностью автоматизировать, то есть осуществлять ее без вмешательства человека, как «устройства для принятия окончательных решений». Эффективное управление распределением шихты (управление

«сверху») невозможно без взаимосвязи с технологией доменной плавки в целом (без АСУ ТП). Оптимизировать распределение на ДП-5 «Запорожстали» должна локальная АСУ БЗУ (автоматизированная система управления). Задача одной из её функций – "Автоматизированное окружное распределение" – уменьшать до заданных пределов разницу в температуре газового потока по окружности колошника, возникающую в процессе работы доменной печи или, другими словами, получить и поддерживать равномерное окружное распределение газового потока.

Используемые ранее автоматические системы не предусматривали изменения самого максимума порции (подачи), а только изменяли сектор, в который он выгружался. Возможности лоткового БЗУ шире. Поэтому дополнительно используется, как изменение ширины сектора с максимумом (1/6, 2/6 или 3/6 окружности), так и самой величины этого максимума. Кроме того, "Автоматизированная оценка окружной неравномерности" позволяет определить вид окружной неравномерности газового потока (по показаниям термопар), который можно компенсировать загружаемой порцией наилучшим образом. Механизм компенсации использует принцип аналогичный «подбору замка к ключу»: вид распределения температуры по окружности (тип "замка"), определяется с учетом возможностей лоткового БЗУ (набора "ключей").

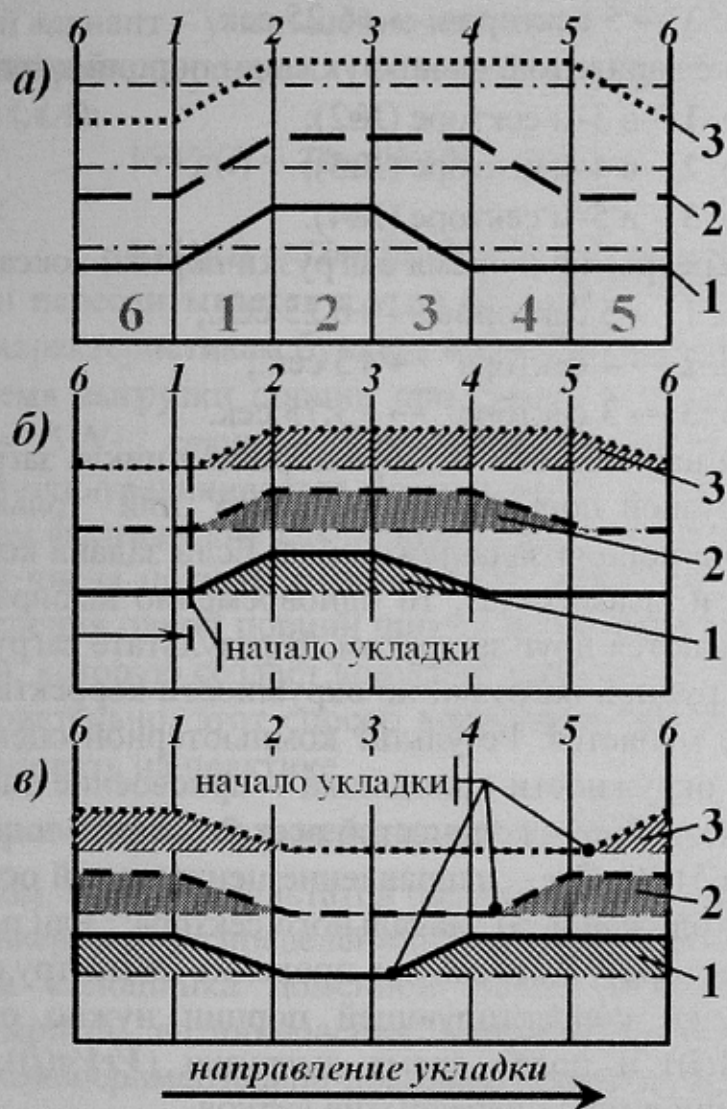
Предусмотрено несколько вариантов компенсации. Технолог может предварительно выбрать любой из них, задав установки для АСУ БЗУ. Указываются: 1) термопары и разница температуры по ним, которая будет уменьшаться до заданных пределов в автоматическом режиме; 2) вид порции (кокс или агломерат), которой неравномерность корректируется; 3) неисправные термопары, показания которых не учитываются. Задание технолога учитывается программой совместно с данными о температуре колошника и загрузке порций. Они являются исходными для расчета новых значений времени выгрузки и начального сектора.

В задании технолог указывает группы термопар, на показания которых автоматика должна реагировать. Все термопары, которые характеризуют окружное распределение газового потока, по месту их установки разбиваются на шесть секторов, границы которых совпадают с шестью "начальными секторами". Это: периферийные термопары над и под уровнем засыпи и в газоотводах. Температура колошника (в каждом из 4-х газоотводов) характеризует газовый поток сразу в двух секторах.

Если автоматическая корректировка не дает желаемых результатов, а разница в показаниях термопар увеличивается и превышает заданное технологическое значение в течение определенного им же времени, то корректировка автоматически останавливается. Загрузка печи продолжается без коррекции и подается сигнал о возможном серьезном расстройстве хода печи, которое нельзя ликвидировать в автоматическом режиме (например «канальный ход»). Технолог, в соответствии с Технологической инструк-

цией, должен самостоятельно: по основным признакам определить вид расстройства и его причину; устранить причину расстройства; выровнять ход печи, используя возможности БЗУ. Так перекося уровня засыпи, как правило, ликвидируют загрузкой подряд двух порций (кокса и агломерата) в секторном режиме, а «канальный ход» – загрузкой кокса в район канала.

Результат автоматизированной оценки окружной неравномерности – определенный для каждого сектора вид: "холодный", "средний" или "горячий". "Горячих" секторов может быть 1, 2 и 3, а "средних" – только 2. Рассмотрим принцип компенсации на трёх примерах (рис.4а).



- а) три варианта оценки АОР;  
 б) компенсация агломератом;  
 в) компенсация коксом.

Рисунок 4 - Принцип компенсации окружной неравномерности температуры газового потока загрузкой порции шихты.

Для всех "средний" – 1-ый сектор, а "горячие" сектора: в примере 1 – 2-ой сектор; в примере 2 – 2-ой и 3-ий секторы; 3 – 2-ой, 3-ий и 4-ый секторы.



Неравномерность компенсируется перекрытием витков (максимумом) порций: агломерата (рис.4б) и кокса (рис.4в). При этом максимум агломерата укладывается в "горячие" сектора, а кокса – в "холодные". Для всех выбранных вариантов, начало укладки порций агломерата (*б*) совпадает с началом 1-го сектора, а команда на открытие затвора подается с опережением: "начальный сектор" №6.

Величина сектора перекрытия и время выгрузки отличаются:

- вар. 1 → 3 сектора → +3,75 сек.;
- вар. 2 → 4 сектора → +5 сек.;
- вар. 3 → 5 секторов → +6,25 сек.

Для этих же вариантов, начало укладки порций кокса (*в*) будет:

- вар. 1 – в 3-м секторе (№2);
- вар. 2 – в 4-м секторе (№3);
- вар. 3 – в 5-м секторе (№4).

Сектора перекрытия и время выгрузки порций кокса:

- вар. 1 → 5 секторов → +6,25 сек.;
- вар. 2 → 4 сектора → +5 сек.;
- вар. 3 → 3 сектора → +3,75 сек.

Коррекция начинается с выбора порции в цикле загрузки. Если задана коррекция загрузкой порций "только кокса" или "только агломерата", то выбирается одна порция заданного вида. Если задана коррекция загрузкой порций "кокса и агломерата", то одновременно выбираются две порции, которые загружаются друг за другом. В результате загрузки обеих порций распределение рудной нагрузки по окружности корректируется, а толщина слоя шихты не меняется. Результат компьютерной оценки распределения температур по окружности колошника – присвоение значения двум переменным (рис. 4): *SsGor* – количество всех "горячих" и двух "средних" секторов (3; 4 или 5); *OsGor* – направление центральной оси "горячих" секторов (по номеру ближайшего "начального сектора": или целые числа от 1 до 6, или номер сектора + 0,5, если ось проходит по центру сектора).

Для загрузки корректирующей порции нужно определить начало укладки (*NSek(i)*) и новое время выгрузки (*VrVg(i)*), обеспечивающее максимум порции в месте перекрытия витков.

Выбираем новый "начальный сектор": *NSek(i)* – исправленный номер начального сектора по окружности (=1, 2, 3, 4, 5, 6).

Таблица 1 – Расчётные формулы

Вид <i>i</i> -ой порции по виду шихты:	Направление вращения лотка:	
	по часовой стрелке	против часовой стрелки
Агломерат ( <i>АА</i> )	$NSek(i) = OsGor - SsGor/2 - 1$	$NSek(i) = OsGor + SsGor/2 + 1$
Кокс ( <i>КК</i> )	$NSek(i) = OsGor + SsGor/2 - 2$	$NSek(i) = OsGor - SsGor/2 + 2$

*NSek(i)* может принимать значения от 1 до 6. Тогда:

если значение  $NSek(i) > 6$ , то  $NSek(i) = NSek(i) - 6$ ;

если значение  $NSek(i) < 1$ , то  $NSek(i) = NSek(i) + 6$ .

После чего рассчитывается новое время выгрузки ( $VrVg(i)$ ) из оптимального времени выгрузки ( $VrVgOp$ ) в такой последовательности:

1) Расчет и округление до целого числа полных витков заданного оптимального времени выгрузки:

$$N = [VrVgOp / TimOb] \quad (2)$$

где  $TimOb=7,5$  с – время одного оборота лотка;  $N$  – число полных витков.

2) В зависимости от задания, число ( $N$ ) уменьшается или увеличивается.

Рекомендуемый вариант – уменьшение на 1 виток:  $N = N - 1$ .

3) Окончательно, исправленное время рассчитывается по формулам:

Для агломерата ( $AA$ ):

$$VrVg(i) = TimOb \cdot (N + SsGor/6) \quad (3)$$

Для кокса ( $KK$ ):

$$VrVg(i) = TimOb \cdot (N + (8 - SsGor)/6) \quad (4)$$

4) Время выгрузки пересчитывается в угол раскрытия шихтового затвора по расходным характеристикам бункера и объему порции.

Обычное время выгрузки порции при работе в режиме "замыкания витков":  $VrVgOp = 7,5 \cdot N + 2$  секунды. Для коррекции окружного распределения, время выгрузки увеличивается (уменьшается) с шагом 1,25 секунды, что больше, чем фактические случайные колебания времени выгрузки. Из-за ограничения числа полных витков ( $N \geq 3$ ) "искусственная" неравномерность распределения одной порции шихты не больше 30%. Это близко к неравномерности, которую создаёт конусное загрузочное устройство, работая ВРШ. Следовательно, этот способ коррекции окружного распределения можно реализовать на практике.

### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Таким образом, анализ результатов опытов по высыпанию шихтовых материалов из бункеров и распределению шихты БЗУ по окружности на секторной модели колошника доменной печи, позволил разработать математическую модель возникновения неориентированной окружной неравномерности. Экспериментально доказана практическая возможность, используя эффект «незамкнутого витка», управлять окружным распределением, изменяя время и начальный сектор выгрузки порции шихты. Описан предлагаемый алгоритм управления. Для его реализации необходимо уточнить реакцию доменной печи на такое воздействие.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В.П. Загрузочные устройства шахтных печей / В.П. Тарасов. – М.: Металлургия, 1974. – 312 с.
2. Тарасов В.П. Распределение материалов и газов по окружности доменной печи / В.П. Тарасов. // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2007. – № 5. – С. 17–22.

3. Быков Л.В. Апробирование алгоритма автоматического управления окружным распределением газового потока в производственных условиях доменной плавки / Л.В. Быков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – № 3. – С. 6–9.
4. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / В.И. Большаков. – К.: Наук. думка, 2007. – 412 с.
5. Влияние частоты вращения распределительного элемента на окружное распределение шихты / А.Л. Брусов, А.Ф. Рыбцов, А.А. Бачинин и др. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. – 1987. – № 9. – С. 19–22.
6. Бачинин А.А. Исследование процесса загрузки и выгрузки шихтовых бункеров бесконусных загрузочных устройств доменных печей / А.А. Бачинин, А.Л. Брусов // *Сталь*. – 1989. – № 7. – С. 10–12.

Поступила в редакцию 02.07.2010    Рецензент д-р техн. наук, проф. С.Л. Ярошевский

© Брусов А.Л., 2010

УДК 669.162

А.В. Кузин

## ОСНОВЫ СОВРЕМЕННОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПОДГОТОВКИ КОКСА К ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ\*

Рассмотрены теоретические предпосылки для снижения расхода кокса в доменной плавке на 50-70% при применении дополнительных видов топлива. Показано, что одной из причин существенного снижения расхода кокса является современная подготовка кокса к доменной плавке по фракционному составу и повышение его горячей прочности до 80-90%.

Ключевые слова: низкорреакционный кокс, зона когезии, коксовый орешек, пылеугольное топливо

### Введение

Как известно, в себестоимости чугуна около 50% всех затрат приходится на стоимость энергоносителей, и первую очередь на кокс. В связи с резко возросшей стоимостью природного газа большинство металлургических предприятий Украины сократили или полностью вывели его из состава дутья, что в итоге способствовало существенному – на 20-30 % – росту удельного расхода кокса.

За рубежом благодаря применению качественного железорудного сырья, использованию высокого температурно-кислородного потенциала дутья, вдуванию дополнительных видов топлива в количестве от 100 до

\* Работа пополнена под руководством д-ра техн. наук, профессора С.Л. Ярошевского (ДонНТУ)