

Совершенствование системы управления распределением материалов в доменной печи с применением бесконусного загрузочного устройства

А.А. Копытов, магистрант кафедры «АСУ»,
М.Ю. Рябчиков, кандидат технических наук, доцент кафедры «АСУ»,
Е.С. Рябчикова, кандидат технических наук, доцент кафедры «АСУ»,
Магнитогорский государственный технический университет
им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск

В статье рассмотрена задача организации автоматической подачи материалов в доменную печь при необходимости обеспечить требуемую схему распределения материалов по радиусу, а также устранить перепады уровней между секторами. Рассмотрены особенности радарных уровнемеров. Показано, что существующие схемы установки датчиков уровня не ориентированы на контроль распределения материалов по радиусу печи. Предложен алгоритм управления, обеспечивающий реализацию программы распределения материалов по радиусу и компенсацию неравномерности уровней по секторам в едином цикле выгрузки материалов.

Бесконусное загрузочное устройство, управление загрузкой материалов, доменная печь, радарный уровнемер.

Improving the management system for the distribution of materials in a blast furnace using a conical charging device

A.A. Kopytov, master student of the Department «ACS»,
M.Yu. Ryabchikov, candidate of engineering sciences,
associate professor at the Department «ACS»,
E.S. Ryabchikova, candidate of engineering sciences,
associate professor at the Department «ACS»,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

В статье рассмотрена задача организации автоматической подачи материалов в доменную печь при необходимости обеспечить требуемую схему распределения материалов по радиусу, а также устранить перепады уровней между секторами. Рассмотрены особенности радарных уровнемеров. Показано, что существующие схемы установки датчиков уровня не ориентированы на контроль распределения материалов по радиусу печи. Предложен алгоритм управления, обеспечивающий реализацию программы распределения материалов по радиусу и компенсацию неравномерности уровней по секторам в едином цикле выгрузки материалов.

Бесконусное загрузочное устройство, управление загрузкой материалов, доменная печь, радарный уровнемер.

Введение

Загрузка шихтовых материалов в доменную печь осуществляется с помощью засыпных аппаратов – конусных и бесконусных. Опыт эксплуатации доменных печей свидетельствует о том, что конусные загрузочные устройства не удовлетворяют в полной мере требованиям технологии распределения шихтовых материалов. Бесконусное загрузочное устройство (БЗУ) предназначено для обеспечения загрузки шихтовых материалов, подаваемых скипами, в доменную печь с управляемым распределением по площади колошника. Совершенствование приемов распределения шихтовых материалов в печи является важным направлением повышения эффективности доменных печей [1].

В настоящее время из восьми работающих доменных печей на ПАО «ММК» БЗУ оснащены пять доменных печей. На доменной печи № 10 ПАО «ММК» установлено однокотловое БЗУ фирмы «PaulWurth», схема расположения конструктивных элементов которого представлена на рисунке 1.

Железорудная руда и кокс поступают из восточного и западного скипа скипового подъёмника в приемную воронку. Затем при открытом верхнем шихтовом затворе материал

поступает в шихтовый бункер, в котором накапливается подача. После того, как заданная подача набрана, закрываются верхний шихтовый затвор и верхний уплотнительный клапан, а в шихтовый бункер нагнетается давление, равное давлению в печи. При опускании материала в печи до требуемого уровня от системы управления формируется команда на выгрузку, после чего открываются нижние уплотнительный клапан и шихтовый затвор. Шихта из бункера выгружается со скоростью, определяемой степенью раскрытия шихтового затвора, движется по наклонной направляющей в центральную точку, расположенную на оси печи внутри планетарного редуктора привода лотка. Затем материал попадает на вращающийся лоток и ссыпается по нему в печь компактной струей. С помощью планетарного редуктора и двух электродвигателей во время загрузки шихтовых материалов осуществляется вращение лотка с постоянной угловой скоростью ω вокруг вертикальной оси печи и изменение по заданной программе угла его наклона (α_n) относительно той же оси.

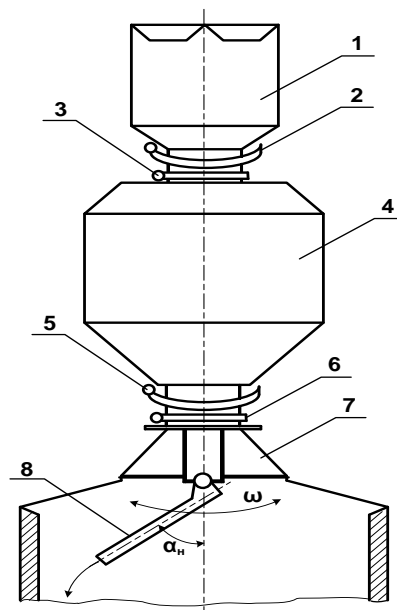


Рисунок 1 – Конструктивные элементы БЗУ (1,4 – приемный и шихтовый бункера; 2,3 – верхние шихтовый затвор и уплотнительный клапан; 5,6 – нижние шихтовый затвор и уплотнительный клапан; 7 – редуктор; 8 – лоток)

БЗУ позволяет реализовать различные виды распределения материалов, загружаемых в печь:

- Кольцо – равномерное распределение материалов по окружности колошника при неизменном угле наклона лотка;
- спираль – отличается от кольцевой загрузки изменением угла наклона во время загрузки;
- сектор – распределение материалов производится колебаниями лотка в заданном секторе колошника;
- точка – лоток позиционируется в заданное положение, после чего производится загрузка материала.

В основном непрерывная загрузка шихтовых материалов в доменную печь осуществляется с помощью работы лотка с распределением шихтовых материалов по спирали. По этой программе задаются углы открытия нижнего шихтового затвора в зависимости от выгружаемого материала и фиксированные углы наклона лотка (станции), на каждый из которых должны подаваться равные весовые доли подачи (устанавливается определенное количество оборотов лотка на каждой станции при выгрузке). Угол наклона лотка относительно оси печи может изменяться от 15° до 48° по 11 фиксированным позициям, причем шаг углов между позициями увеличивается по мере уменьшения угла наклона лотка так, чтобы обеспечить расположение вершин гребней посередине колец равной площади на поверхности засыпи. Результат такой работы системы по такому принципу представлен на рисунке 2. На нём изображен уровень засыпи шихты двух датчиков уровня, расположенных противоположно друг к другу.

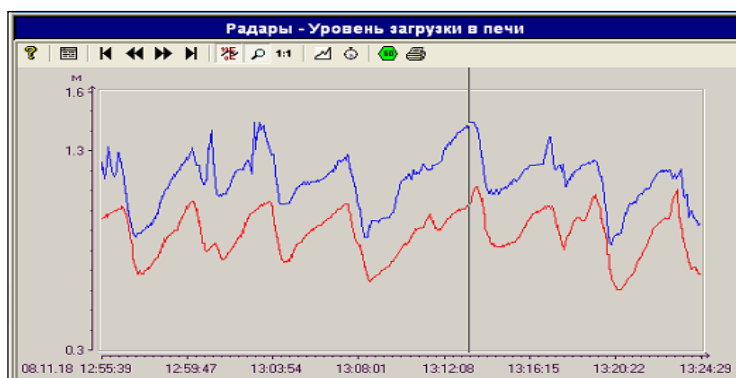


Рисунок 2 – Уровень засыпи в контрольных точках доменной печи № 10 «ММК»

Из рисунка 2 видно, что распределение шихтовых материалов по спирали не всегда позволяет обеспечить равномерность уровня по сечению печи. Перепад уровней между двумя контрольными точками составляет около 30-40 см. Причиной является возможная неравномерность схода шихтовых материалов по сечению печи.

Для обеспечения более равномерного уровня шихты по сечению печи при управлении подачей материалов целесообразно использовать данные с датчиков уровня. На рисунке 3 показана текущая схема установки датчиков по сечению печи, условно разделенному на двенадцать секторов.

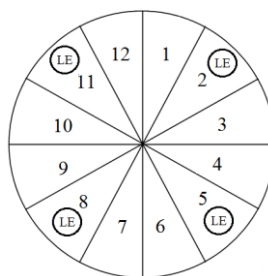


Рисунок 3 – Текущее расположение датчиков уровня по сечению доменной печи № 10 ПАО «ММК»

Необходимо отметить, что, несмотря на наличие датчиков уровня, существующие алгоритмы автоматического управления распределением материалов используют статичные схемы распределения. Такие схемы часто формируются персоналом экспериментально под условия работы конкретных доменных печей. Так в [2] указывается, что порции шихтовых материалов традиционно распределяют практически по всему радиусу колошника и с различной цикличностью выгружают кокс в центральную зону колошника для формирования 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 объемы материалов в зонах. При таком формировании программ загрузки обеспечивается укладка материалов с минимальным перераспределением шихты вдоль радиуса. В то же время, пример на рисунке 2 показывает недостаток такого подхода.

В [2] предлагается корректировка программ загрузок на основе данных термозондов. При этом данные оперативного контроля уровня не вовлекаются в алгоритм оперативного управления. Для разработки системы автоматического управления, использующей данные с датчиков уровня, необходимо получить оценки неравномерности распределения уровня шихтовых материалов по сечению печи.

Оценка неравномерности распределения уровня шихтовых материалов по сечению печи

Простейший способ приближенной оценки уровня шихты в различных секторах по сечению доменной печи заключается в линейной интерполяции данных с датчиков. То есть, например, уровни в секторах № 6,7 (рис. 3) рассчитываем по результатам контроля уровня в секторах № 5 и 8.

В то же время отсутствует информация о распределении уровня материалов в направлении от кожуха к центру печи (по радиусу печи). Данные об уровнях в противоположных относительно центра секторах сложно использовать для получения достоверной информации о перепадах уровней

по радиусу печи. Причиной является большая удаленность точек контроля друг от друга. В таком случае представляет интерес оценка возможности использования данных с отдельного датчика уровня для оценки изменения уровня по радиусу печи.

На доменной печи № 10 для контроля уровня засыпи шихты используется датчик уровня Micropilot M FMR57 [3]. Датчик является радарной системой, работающей по принципу измерения времени прохождения сигнала. Прибор измеряет расстояние от начала точки измерения до поверхности шихты. Отраженные импульсы принимаются антенной и передаются в электронный блок. Микропроцессор рассчитывает и идентифицирует эхо-сигнал, возникающий при отражении радарного импульса от поверхности шихты. Общий вид датчика показан на рисунке 4,а.

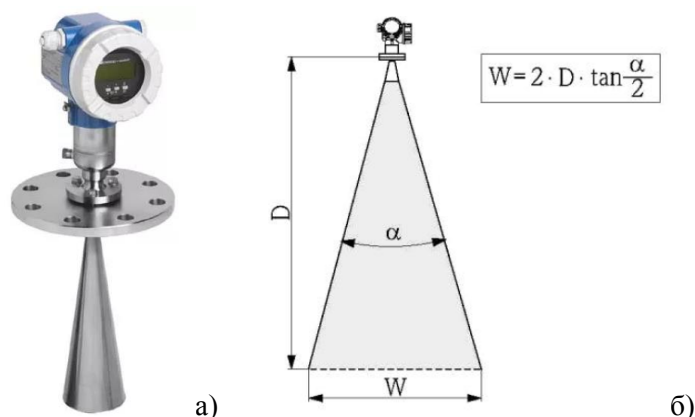


Рисунок 4 – Общий вид датчика уровня Micropilot M FMR57 (а), а также зависимость между углом α , расстоянием D и диаметром луча W

Из рисунка 4,б видно, что датчик формирует обобщенную оценку уровня для области шихты, определяемой шириной луча W . Для датчика FMR57 угол α достигает 10° . Из данных на рисунке 2 следует, что область W датчика уровня охватывает значительную часть радиуса печи, поскольку наблюдается рост уровня практически в течение всего периода подачи материалов.

Тогда, теоретически, по динамике изменения уровня при равномерной подаче материалов путем выгрузки по спирали можно получить оценки распределения уровня по радиусу в области W . Для этого необходима информация о влиянии степени удаленности точки отражения от центра области W на мощность регистрируемого сигнала. Изучение технических инструкций датчиков разных производителей, включая FMR57, показало отсутствие подобной информации.

Неточную приближенную зависимость можно получить путем сопоставления данных об угле α и допустимых расстояниях до контролируемой среды при использовании различных типов антенн. Так, для датчика Rosemount серии 5600 [4] при использовании конических антенн можно получить зависимость (рис. 5). Предположили, что мощность сигнала можно поставить в соответствие среднему расстоянию точек области W от центра области W . Учитывая, что для окружности среднее расстояние точек от центра составляет $(2/3)R$, где $R = 0,5W$, то есть пропорционально W , можно получить приближенную качественную зависимость мощности сигнала, полученного путем отражения от точки, удаленной от центра области W . При получении зависимости приняли минимальную мощность сигнала и максимальное расстояние от центра для трех различных антенн за условную единицу.

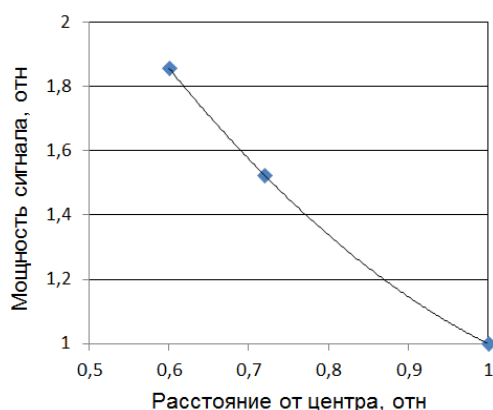


Рисунок 5 – Качественная зависимость мощности сигнала, полученного путем отражения от точки,

удаленной на расстояние от центра области W

Предполагая наличие тенденции, представленной на рисунке 5, возможно сопоставление динамик изменения уровня при различных начальных распределениях уровня по радиусу печи. На рисунках 6,а-б показаны различные варианты начального распределения по относительному радиусу печи и соответствующие качественные зависимости скорости изменения уровня от времени при моделировании подачи материалов путем их распределения по спирали. На рисунке 6,в показаны примеры фактических зависимостей по данным доменной печи № 10.

Из полученных результатов (рис. 6,б) следует относительно слабое влияние начального распределения уровня материала в области W на динамику изменения контролируемого уровня. Непостоянство скорости изменения уровня вследствие хода процесса в доменной печи препятствует применению результатов моделирования при оценке параметров распределения уровня по радиусу печи по данным отдельного датчика уровня.

Таким образом, для контроля распределения уровня материала по радиусу печи, необходима установка дополнительных датчиков. Вариант такого размещения датчиков показан на рисунке 7. Нужно учитывать, что контроль уровня с использованием датчиков в секторах № 3,7,11 может быть затруднен при определенных программах управления лотком, вследствие перекрытия луча датчика конструктивными элементами лотка.

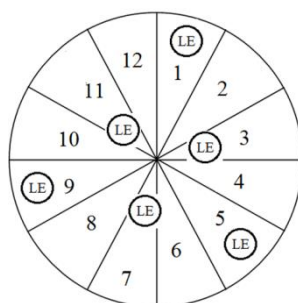
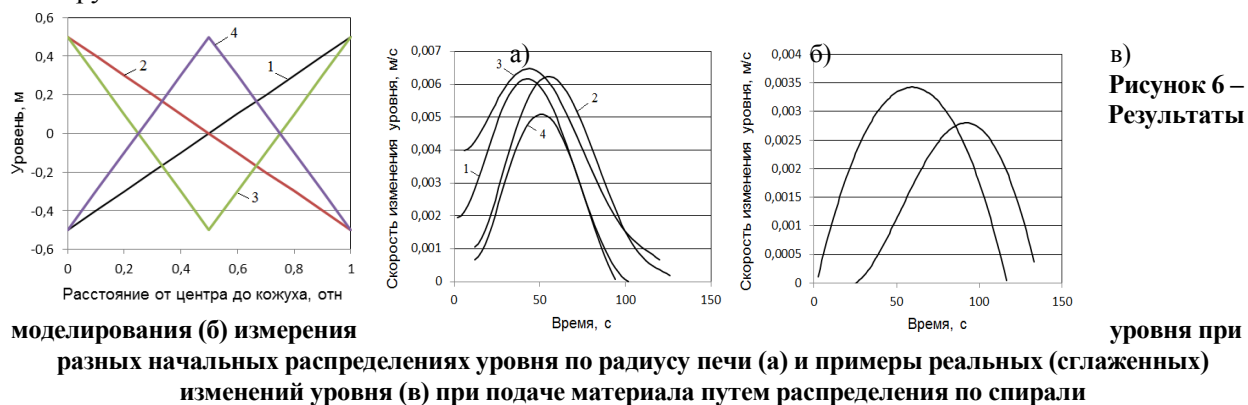


Рисунок 7 – Вариант расположения датчиков уровня по сечению доменной печи

При отсутствии контроля распределения уровней по радиусу печи сложно одновременно обеспечить требуемое распределение материалов по радиусу печи с сохранением высокой степени равномерности уровней по секторам, вследствие отсутствия необходимой исходной информации. Для частичного решения проблемы необходима разработка алгоритма управления.

Алгоритм управления распределением материалов

Предлагаемый алгоритм управления распределением материалов основан на управлении лотком БЗУ и положением нижнего шихтового затвора (НШЗ). Схема алгоритма представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма управления углом наклона и положением затвора:
 α , α_{\min} , α_{\max} - текущий, минимальный и максимальный угол наклона лотка

По полученным на основе линейной интерполяции данным четырех датчиков определяются значения уровня в каждом секторе. Далее для каждого сектора формируется желаемый расход шихты на основе статической характеристики (рис. 9).

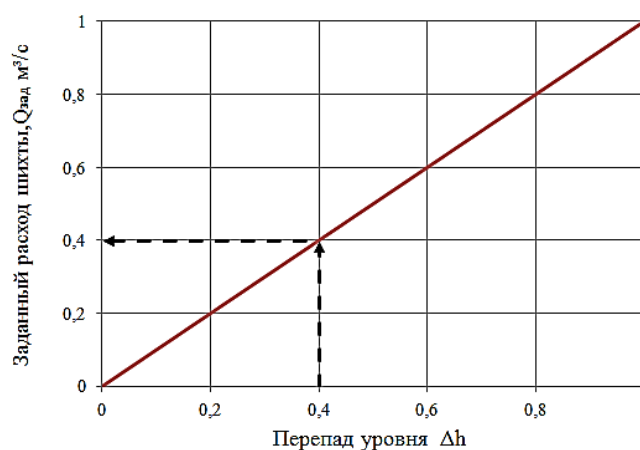


Рисунок 9 – Статическая характеристика зависимости заданного расхода шихты от перепада уровня

По полученному желаемому расходу шихты определяется желаемый угол наклона лотка в каждом секторе. Для этого используем статическую зависимость на рисунке 10. Зависимость на рисунке 10 динамически подстраивается согласно алгоритму, рассмотренному в [5], путем сопоставления расчетного и фактического времени выгрузки.

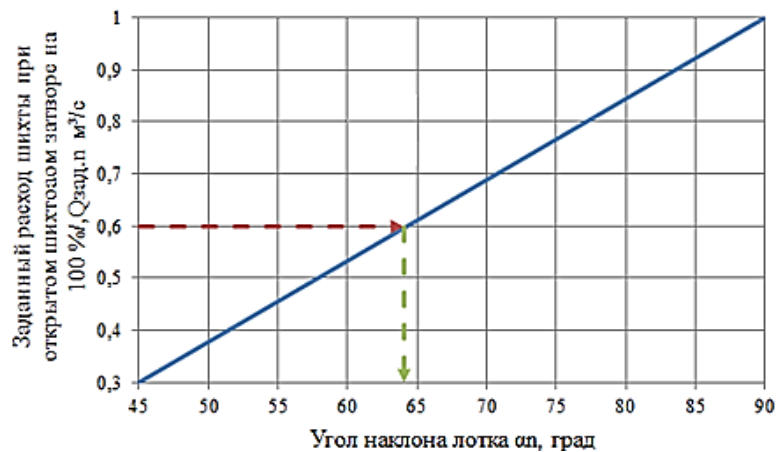


Рисунок 10 – Статическая характеристика зависимости угла наклона лотка от заданного расхода шихты при открытии НШЗ на 100%

Зависимость расхода от угла наклона лотка и положения НШЗ определим в виде:

$$Q = \frac{Y}{100} (\alpha \cdot a + b), \quad (1)$$

где Y – положение НШЗ; a, b – коэффициенты линейной зависимости на рис. 10 ($a = 0,0156$; $b = -0,4$).

Тогда желаемый угол наклона лотка в секторе:

$$\alpha = \frac{100Q - Yb}{Ya}. \quad (2)$$

В зависимости от заданного значения угла наклона его фактическое значение стремится к заданию, тем самым происходит его опускание или поднятие в каждом из секторов:

$$\alpha(\tau) = \alpha(\tau - \Delta\tau) \pm V_1 \Delta\tau, \quad (3)$$

где V_1 – скорость наклона лотка (5,6 град./с), $\Delta\tau$ – шаг по времени.

Пока текущий угол наклона лотка не достигнет заданных крайних положений, положение нижнего шихтового затвора не будет изменяться. Когда угол наклона лотка достигнет максимума, шихтовый затвор начнет открываться. Когда угол наклона достигнет минимума, шихтовый затвор будет закрываться. Время полного хода (0-100%) затвора 20 с. При моделировании использовали угол $\alpha = 90 - \alpha_n$, где α_n – угол наклона относительно оси печи согласно рисунку 1. Упрощенно приняли, что предельные значения угла наклона лотка α составляют 45 и 90°.

Применение рассмотренного алгоритма ориентировано на компенсацию неравномерности уровня с применением датчиков контроля уровня. Однако этот алгоритм не решает задачу обеспечения заданного распределения материалов по радиусу печи. На рисунке 11 показаны примеры [2] типовых вариантов распределений подач по радиусу.

Для организации распределения материалов согласно программе зададим траектории изменения граничных предельно допустимых углов наклона лотка α_{\min} и α_{\max} . Такие зависимости целесообразно определить с использованием в качестве аргумента относительной доли поданного материала.

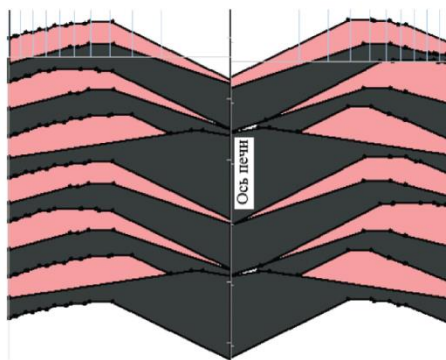


Рисунок 11 – Примеры распределения материалов при подаче (темным показан кокс) согласно [2]

При моделировании подачи материалов учитывали распределение материалов по радиусу печи, а также использовали разработанную модель контроля уровня. Принято, что в период подачи материалы в печи равномерно опускаются с постоянной скоростью 0,005 м/с (это возмущение превышает типовое в 2-3 раза). Моделируется перемещение материала между сегментами секторов, которое возникает вследствие пересыпания. При этом угол естественного откоса кокса принят равным 42° [6].

Начальное распределение материалов по радиусу показано на рисунке 12,а для секторов, где предусмотрен контроль уровня. Модель датчиков контроля уровня предполагает охват части относительного радиуса печи от 0,428 до 0,857. При численном моделировании каждый сектор разбили на семь сегментов.

Принятые зависимости для α_{\min} и α_{\max} показаны на рисунке 12,е. Они подобраны, исходя из предположения о необходимости выполнить выгрузку кокса в центральную зону колошника для формирования зоны повышенной газопроницаемости.

На рисунке 12,д представлены переходные процессы по контролируемым перепадам уровней в противоположащих восьмом и втором секторах. Видно, что системе управления удалось обеспечить равенство измеренных уровней.

Итоговое распределение уровней по радиусу секторов с датчиками показано на рисунке 12,б. Расхождение уровней увеличивается по мере отклонения от областей контроля W . Программа подачи кокса, предусматривающая постепенное снижение итогового уровня засыпи от центра печи к кожуху, была успешно реализована. На практике такая корректировка может потребовать соответствующего увеличения рудной нагрузки в секторах, куда было подано больше кокса. Поэтому корректировка уровней при возникновении значительных отклонений может носить постепенный характер, предусматривая устранение отклонений за несколько подач материалов.

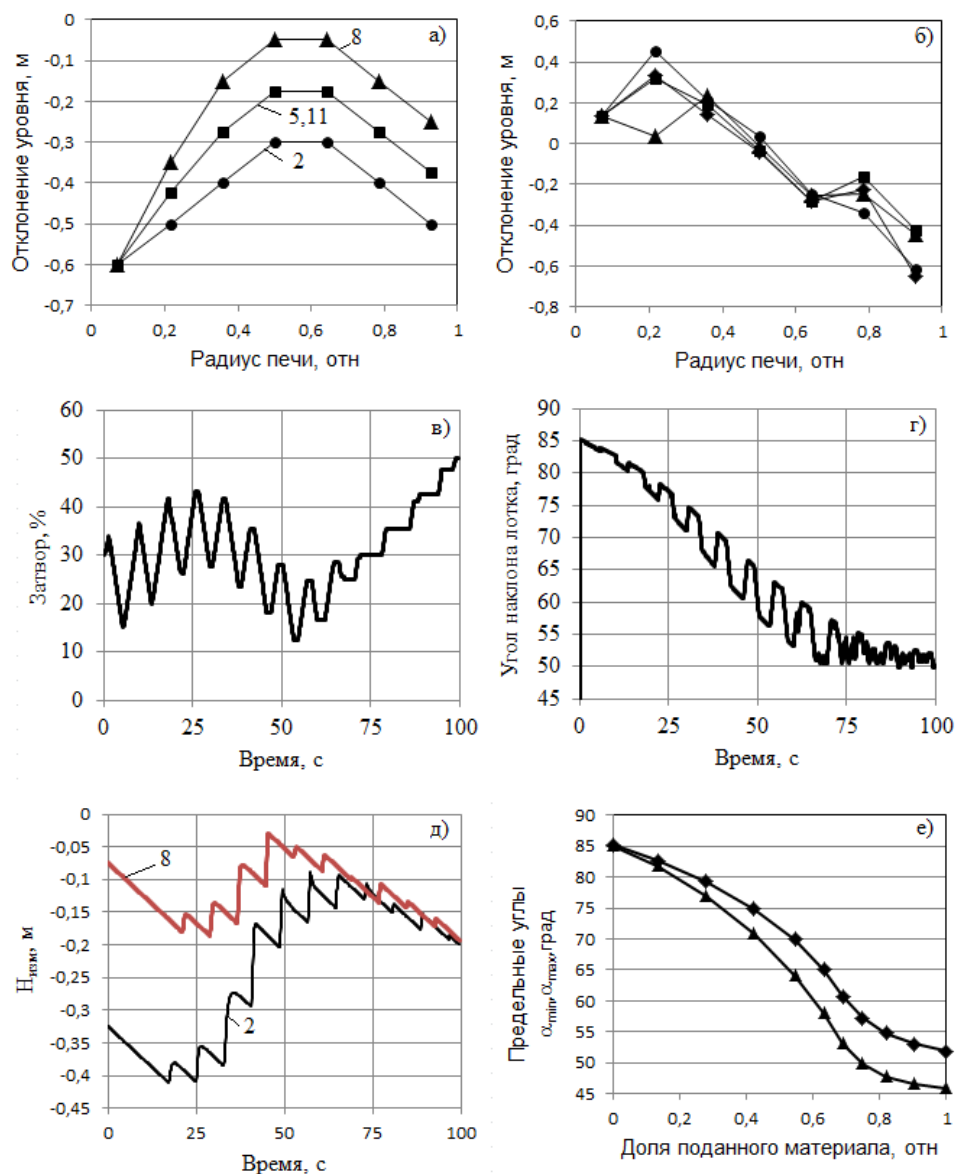


Рисунок 12 – Пример моделирования работы алгоритма управления распределением материала по сечению печи (цифрами отмечены номера секторов)

На рисунке 12, в, г показана динамика изменения степени открытия затвора и угла наклона лотка. Изучение различных вариантов ограничений на предельные углы наклона α_{\min} и α_{\max} показало возможность воздействия на нагрузку на исполнительные устройства. При возможности вариации угла наклона в широких пределах частота перемещения затвора может быть существенно снижена.

Входящий в состав БЗУ шихтовый затвор рассчитан на дозированную подачу в колошник доменной печи. Данный ресурс управления целесообразно использовать, вследствие того, что входящий в состав распределительного устройства планетарный редуктор, ориентирован на вращение вокруг вертикальной оси с постоянной скоростью. Необходимо отметить, что применение рассмотренного алгоритма управления накладывает повышенные требования на мощность электропривода наклона лотка. Учитывая, что максимальный статический момент на электродвигателе соответствует углу наклона $\alpha_n = 48^\circ$, при отсутствии резервов по мощности электропривода с ростом α_n (или уменьшением α) возможно сужение интервала между предельными углами наклона α_{\min} и α_{\max} с целью компенсации неравномерностей уровня с использованием одного только затвора.

Заключение

Рассмотренная система автоматического управления подачей шихтовых материалов позволит распределять загрузки шихтовых материалов с учетом контроля уровня засыпи. С увеличением числа

датчиков уровня засыпи шихты на колошнике можно снизить степень неравномерности уровня засыпи по сечению печи. Это в итоге поможет увеличить производительность доменной печи и улучшить параметры газового потока.

Предложенная система автоматического управления подачей материалов может использоваться при различных схемах установки датчиков. Рассмотренный в примере вариант предполагает контроль уровня в четырех секторах без возможности измерения распределения неравномерности по радиусу. При установке дополнительных датчиков, например, согласно схеме на рис. 7, применяемое в алгоритме отклонение уровня от задания в каждом секторе будет определяться как взвешенное среднее по данным разных датчиков с учетом текущего угла наклона лотка.

Литература

1. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Иванча Н.Г., Вишняков В.И., Шумельчик Е.И. Исследования параметров потока шихтовых материалов и их распределения на колошнике современной доменной печи // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 3. С. 87-92.
2. Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горпуха В.В. Эффективное управление загрузкой доменной печи и использование современных средств контроля в изменяющихся технологических условиях // *Металлург*. 2017. № 11. С. 33-39.
3. Micropilot FMR56, FMR57. Радарный уровнемер. Измерение уровня сыпучих продуктов. Инструкция по эксплуатации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://data2.lact.ru/f1/s/16/557/basic/1503/801/FMR_56__FMR57__Radarnyy_urovner_e_urovnya_syipuchih_produkto.pdf.
4. Радарный датчик уровня Rosemount серии 5600 с протоколом HART и Foundation fieldbus. Справочное руководство. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docplayer.ru/31229931-Radarnyy-datchik-urovnya-rosemount-serii-5600-s-protokolom-hart-i-foundation-tm-fieldbus.html>.
5. Рябчиков М.Ю., Трофимов Л.М. Повышение эффективности управления бесконусным загрузочным устройством в доменном цехе ОАО «ММК» // *Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии*. 2009. № 3. С. 118-124.
6. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса. Учебное пособие // *Магнитогорск: МГТУ*. 2009. 257 с.