

УДК 66.041.53.001.57:669.18

И.Г.Тригуб, В.И.Головко, А.Н.Селегей, М.А.Рыбальченко, Г.А.Папанов

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ШИХТЫ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕКОСА ЗАСЫПИ ПРИ ЗАГРУЗКЕ ПЕЧЕЙ ШАХТНОГО ТИПА

На основе анализа множества факторов, характеризующих направление движения потока шихтового материала в процессе загрузки шахтных печей, разработана каркасная матричная модель засыпи кусковых материалов, позволяющая поэтапно (дискретно) восстанавливать форму поверхности на колошнике. По результатам экспериментальных исследований на модели получена динамика значений углов откоса засыпи по мере заполнения шахты, определяемых в области проекции радиолуча уровнемера на наклонную поверхность как симметричного, так и асимметричного конусов засыпи.

Ключевые слова: печи шахтного типа, поверхность засыпи, каркасное моделирование, угол откоса, радарный уровнемер

На основі аналізу безлічі факторів, що характеризують напрямок руху потоку шихтового матеріалу в процесі завантаження шахтних печей, розроблена каркасна матрична модель засипу кускових матеріалів, яка дозволяє поетапно (дискретно) відновлювати форму поверхні на колошнику. За результатами експериментальних досліджень на моделі отримана динаміка значень кутів укосу засипу по мірі заповнення шахти, що визначаються в області проєкції радіопроменя рівнеміра на похилу поверхню як симетричного, так і асиметричного конусів засипу.

Ключові слова: печі шахтного типу, поверхня засипу, каркасне моделювання, кут укосу, радарний рівнемір

The wireframe matrix model of the grist lump materials was designed based on analysis of multiple factors that characterize the direction of the flow of charge material during the loading kilns shaft. This model allows to restore by stages (discretely) the surface shape on the throat. According to results of experimental research on the model, the dynamics of values angles slope of a mound was received in process shaft filling. Angles of the slope are determined in the radio beam projection of the level gauge at a sloping surface of both symmetric and asymmetric cones mound.

Keywords: shaft furnaces, the surface of the mound, the wireframe modeling, the angle of slope, the radar sensor

Современное состояние вопроса

Высокопроизводительная и экономичная работа печей шахтного типа, как доменных, так и известково-обжиговых, во многом определяется тем, как организовано движение и распределение газов и шихты в их рабочем пространстве. Одним из основных факторов, влияющих на характер движения газов в печах, является распределение шихты на колошнике во время загрузки [1]. Для управления распределением потоков материала и газа применяются многочисленные технологические приемы, эффективность которых достаточно высока [2]. Однако, при нерациональном профиле (конфигурации поверхности засыпи) печи суммарный эффект от этих

воздействий может быть сведен к минимуму. В связи с этим формирование профиля рабочего пространства шахтных печей с заданными параметрами формы поверхности засыпи является актуальной задачей при организации процессов управления загрузкой.

Анализ публикаций по теме исследования

Неравномерность распределения шихты на колошнике, создаваемую загрузочным устройством, разделяют на ориентированную и неориентированную окружную неравномерность. Множественные исследования, проводимые на доменных печах, доказывают, что в отличие от неориентированной неравномерности, которая меняется от подачи к подаче, ориентированная неравномерность накапливается, образуя при этом перекосящий профиль засыпи [3]. Это приводит к нарушению хода печи и, как следствие, к снижению эффективности и повышению энергозатратности доменной плавки. Применение в настоящее время усовершенствованных бесконусных загрузочных устройств разной конструкции (лотковых роторных) способствует более точной загрузке материалов в печи, однако эти новации не позволяют оценить сформированный профиль и, следовательно, прогнозировать дальнейшую конфигурацию поверхности после опускания шихты.

Для шахтных известково-обжиговых печей также существует подобная проблема, связанная с необходимостью оценки формы поверхности в процессе загрузки карбонатного сырья, поскольку установлено влияние конфигурации поверхности на характер протекания процессов обжига и показатели работы печи [4].

В данной статье рассматриваются результаты экспериментальных и теоретических исследований закономерностей формирования столба шихтовых материалов в шахтной известково-обжиговой противоточной печи на основе компьютерного моделирования каркаса поверхности засыпи на колошнике по мере загрузки. Исследования направлены на разработку технических решений, обеспечивающих целенаправленное формирование столба шихтовых материалов в печах шахтного типа с учетом их конструктивных особенностей.

Формулирование целей статьи

Целью данной работы является создание каркасной матричной модели засыпи кусковых материалов, позволяющей поэтапно (дискретно) восстанавливать форму поверхности на колошнике известково-обжиговой печи в процессе загрузки.

Основная часть

Экспериментальные исследования процесса загрузки и формообразования поверхности карбонатного сырья проводились применительно к шахтной известково-обжиговой печи №2 ОАО «ЛМЗ им. Петровского». Через монтажные люки в кожухе печи осуществлялся предварительный мониторинг заполнения шахты в перерывах между

подачами кускового материала крупностью от 50 до 200 мм (рис. 1). Таким образом, в первом приближении была идентифицирована форма засыпи – симметричный конус относительно центра печи – и оценены факторы, оказывающие влияние на изменение параметров конуса (положение вершины и углов откоса образующих). Также установлено, что симметрия имеет место только на некоторой высоте шахты и определяется геометрией потока загружаемого материала.

С увеличением высоты столба материалов в шахте, по мере ее заполнения, изменяются как координаты вершины, так и значения углов откоса образующих конуса в зависимости от:

- влажности и фракционного состава кусков сырья, что определяет диапазон траекторий падения в печном пространстве и последующее распределение материала по откосам поверхности,
- скорости и траекторий перемещения каждого отдельного куска внутри объема засыпи к выпускным отверстиям,
- увеличения объема частиц вследствие обжига,
- возможного образования настывлей, препятствующих свободному сходу материала.

Подача шихтовых материалов на колошник печи осуществляется конвейерным загрузочным устройством, с помощью которого возможно последовательное заполнение нескольких расположенных в ряд шахтных печей. С движущейся транспортной ленты раздаточного конвейера известняк поступает по наклонному желобу в печь через загрузочное окно, расположенное в верхней части шахты.

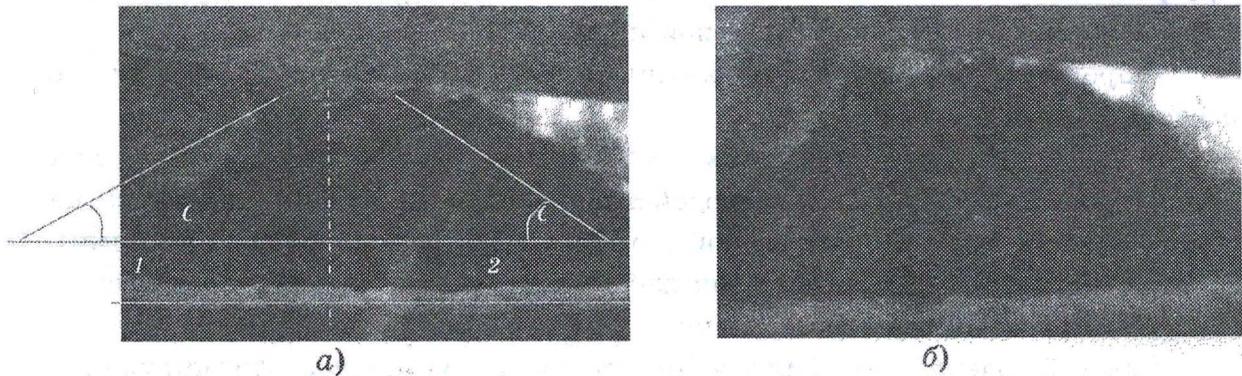


Рисунок 1 – Кадры видеоизображения засыпи в шахтной печи

В случае рассматриваемого способа загрузки поток материала после отрыва кусков от кромки наклонного желоба движется в печном пространстве по параболическим траекториям, формируя неровную конусообразную поверхность. Именно то, что по мере заполнения шахты изменяются только положение (координаты относительно центра печи) вершины и значения углов откоса образующих (при постоянстве конусообразной формы поверхности), для математического описания засыпи в процессе загрузки или выгрузки печи симметричный конус может

быть принят в качестве каркаса (скелета) засыпи. Под *каркасной моделью* понимается геометрическая модель, представляющая собой конечное множество точек или линий, принадлежащих поверхности моделируемого объекта.

Конус засыпи в шахте имеет неявно выраженную вершину, за которую может быть принят наиболее высоко расположенный кусок. Откосы конуса не ровные, на некоторой высоте симметричны относительно центра печи, имеющие величину углов наклона образующих α_1 и α_2 . Их количественная оценка была выполнена путем измерения угла наклона касательной к контуру откоса засыпи на кадре видеоизображения засыпи в печном пространстве, так $\alpha_1 = 32^\circ$ и $\alpha_2 = 35^\circ$ (рис. 1, а).

Оценка смещения вершины засыпи относительно центра печи по вышеуказанным фрагментам видеоизображений не проводилась, так как предполагаемое смещение целесообразно определять в диаметральном сечении печи, проходящем по горизонтальной составляющей вектора скорости поступающего в шахту потока материала.

Идея каркасного моделирования заключается в имитации поведения поверхности засыпи в зависимости от существующих условий загрузки и фракционного состава кусковых материалов. Корректировка параметров или проверка адекватности модели засыпи ее реальной форме выполнена с учетом информации от радиолокационного измерительного средства (уровнемера), установленного на шахтной печи.

При разработке модели были приняты следующие допущения:

- модель основана на теоретических знаниях о поведении кусковых материалов в процессе их переработки и на визуальных наблюдениях формы засыпи известняка в шахтной печи,
- процессы, связанные с химическими реакциями, в модели не рассматривались.

Модель засыпи кусковых материалов классифицирована как абстрактная, описание и взаимодействие ее компонентов выполнено на основе средств и методов линейной алгебры (матриц и действий над ними), а реализация – на основе базовых конструкций и функций языка программирования высокого уровня.

Для соблюдения подобия свойств реальных элементов, формирующих объект исследования (частиц кускового материала), в качестве элементарной структурной единицы в модели принят элемент массива (матрицы). Реальная поверхность засыпи смоделирована на основе совокупности элементов матриц, упорядоченных между собой по заданным алгоритмам с учетом правил линейной алгебры.

Таким образом, поверхность кусковых материалов в шахтной печи представлена в виде каркасной матричной модели дискретных состояний геометрической формы засыпи, с последующей ее программной реализацией и возможностью трехмерной визуализации. При этом задача моделирования состояла в определении высоты засыпи в центральной части

печи, на периферии, а также на любом радиусе в указанном сечении шахты. Дополнительной задачей моделирования являлось определение размера порции (дозы) известняка для загрузки в зависимости от полученных значений уровня, углов откоса и смещения вершины засыпи относительно центра печи.

Основные этапы создания каркасной матричной модели засыпи:

- аналитический расчет координат вершины конуса, привязанных к соответствующим точкам на траектории движения среднего куска из загружаемой подачи известняка, в зависимости от уровня шахты печи;
- разработка алгоритмов программной реализации конструктивных элементов печи и радарного уровнемера;
- разработка алгоритмов расчета и формирования симметричного и асимметричного относительно центра печи конуса засыпи, вычисление угла откоса засыпи α ;
- программная реализация дискретных состояний формы засыпи;
- трехмерная визуализация формы засыпи материала, а также контуров шахтной печи и уровнемера.

Алгоритмическое решение модели каркаса поверхности засыпи заключалось в реализации последовательного заполнения шахты порциями материала z конечного объема P_z (рис. 2) с задаваемой крупностью кусков d_k . Объем загружаемой порции определялся исходя из предыдущего состояния (формы) поверхности.

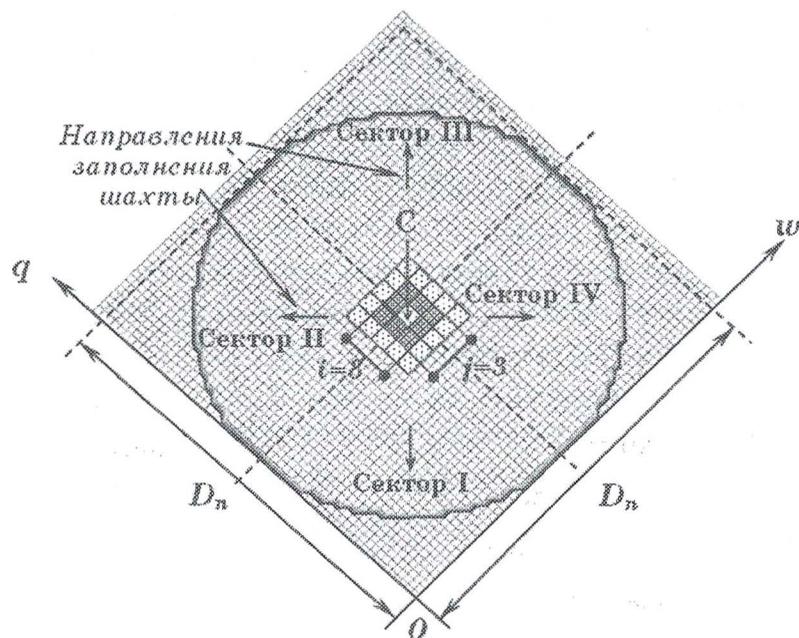


Рисунок 2 – Иерархия обозначений индексов для определения массивов порций загрузки

Каждая порция загружаемого материала дискретизирована на конечное число элементов-кусков и представлена в виде массива $[q(i), w(j)]$. Формирование засыпи осуществлялось порционно путем математических действий над указанными массивами данных (матрицами состояний). Заполнение шахты с имитацией рассыпания шихтовых

материалов по поверхности засыпи в модели осуществлялось небольшими порциями z одновременно по четырем секторам горизонтальных сечений шахты (рис. 3).

Суммарное количество порций n зависит от заданной максимальной критической высоты засыпи в печи. Каждая порция загрузки кускового материала P_z состоит из определенного конечного числа слоев k , которые описываются массивом $P_z(k)$.



Рисисунок 3 – Плоскость основания засыпи

Первый и последующие слои k каждой загружаемой порции z располагаются в пространстве печи симметрично относительно координат вершины конуса, «движущейся» по траектории среднего куска материала. Начальное смещение вершины $\Delta S_{x,y}$ относительно центра печи определялось по формулам

$$S_y = S_x \cdot \operatorname{tg} \alpha_z + \frac{g \cdot S_x^2}{2 \cdot v^2 \cdot \cos^2 \alpha_z}, \quad (1)$$

$$S_x = \frac{v^2 \cdot \sin 2\alpha_z}{2 \cdot g} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2 \cdot g \cdot S_y}{v^2 \cdot \sin^2 \alpha_z}} - 1 \right), \quad (2)$$

где α_z – угол наклона загрузочного желоба, град; v – скорость движения кусков в свободном пространстве печи под действием силы тяжести, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

В качестве минимального значения высоты слоя принят размер среднего куска материала ($\Delta h = d_k = 50$ мм). Текущее состояние (высота)

засыпи P_k при загрузке очередной z -той порции материала в печь Δh_z описывается уравнением

$$P_{k=z}[h(q(i), w(j))] = P_{k=0}[h(q(i), w(j))] + \sum_{z=1}^n \Delta h_z, \quad (3)$$

где z – номер матрицы (порции) загрузки; n – число матриц (порций) загрузки; i, j – индексы, определяющие размерность матрицы слоя k загружаемой порции z .

Каркас засыпи, а именно конус, формируется путем «отсечения» (обнуления) тех элементов массивов, образующих слои, индексы которых расположены за пределами кругового контура сечения шахты печи и каждого слоя в отдельности. Процесс заполнения печи порциями материала осуществляется до тех пор, пока значение уровня засыпи в точке встречи радиолуча уровнемера с поверхностью (q_{rdu}, w_{rdu}) не достигнет верхнего заданного уровня загрузки H_{av}

$$h[q(i = q_{rdu}), w(j = w_{rdu})] < H_{av}. \quad (4)$$

Текущее значение угла откоса определяется по формуле

$$\alpha = \arctg \frac{h[q(i = q_v), w(j = w_v)] - H}{\sqrt{(w_v \cdot d_k - w_{rdu} \cdot d_k)^2 + (q_v \cdot d_k - q_{rdu} \cdot d_k)^2}}, \quad (5)$$

где $h[q(i = q_v), w(j = w_v)]$ – высота вершины конуса засыпи, м; H – уровень засыпи в точке встречи оси радиолуча уровнемера с поверхностью, м; (q_{rdu}, w_{rdu}) – координаты центра антенны (оси радиолуча) на плоскости основания засыпи.

Таким образом, в ходе моделирования дискретного заполнения шахты определялись: высота вершины засыпи $h(V_x, V_y)$, смещение вершины ΔS (табл. 1), высота засыпи $h(D_{q-w})$ у стен печи в диаметральных сечениях шахты, угол откоса α в области радиолокационного зондирования, расстояние от антенны уровнемера до поверхности D , высота засыпи H в точке встречи радиолуча с поверхностью материала (рис. 4, 5).

Таблица 1

Результаты расчета смещения вершины засыпи ΔS

z	48	65	83	97	112	125	137	148
h, м	2,46	3,35	4,18	4,95	5,66	6,32	6,92	7,46
ΔS , м	0,43	0,38	0,33	0,28	0,23	0,18	0,13	0,08

На основе обработки и анализа результатов моделирования асимметричного конуса засыпи определены значения углов откоса поверхности засыпи α_{rdu} .

Определена окружная неравномерность – высота засыпи у стен шахты, причем, чем больше смещение вершины относительно центра печи, тем большее значение перепада высот в диаметральном сечении шахты, проходящем по оси наклонного желоба (в направлении потока загружаемого материала). На рабочей высоте $h(V_x, V_y) = 6,90$ м, при смещении вершины $\Delta S = 0,13$ м и угле откоса $\alpha = 44^\circ$, перепад высот у футерованных стен шахты печи составляет 0,32 м.

Установлена закономерность изменения значения угла откоса засыпи с увеличением высоты засыпи и уменьшением смещения вершины относительно центра печи.

Параметры каркасной матричной модели засыпи корректировались по информации об уровне (высоте) материалов в локальной зоне поверхности и по величине угла откоса засыпи на измеренной радарным уровнемером высоте [5].

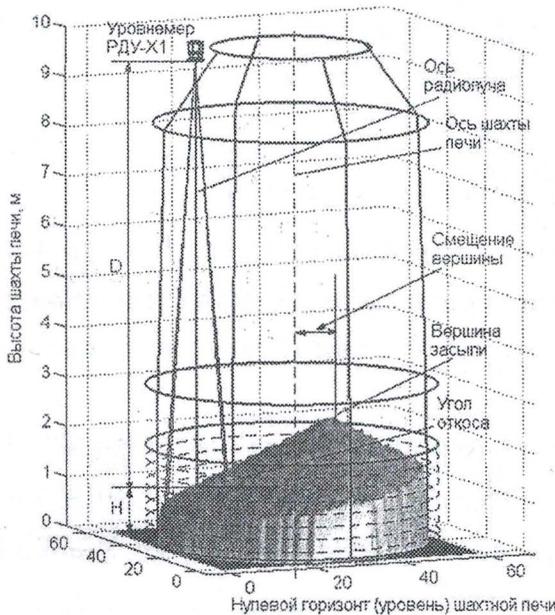


Рисунок 4 – Визуализация модели асимметричного конуса засыпи на горизонте (уровне) окон выдачи извести

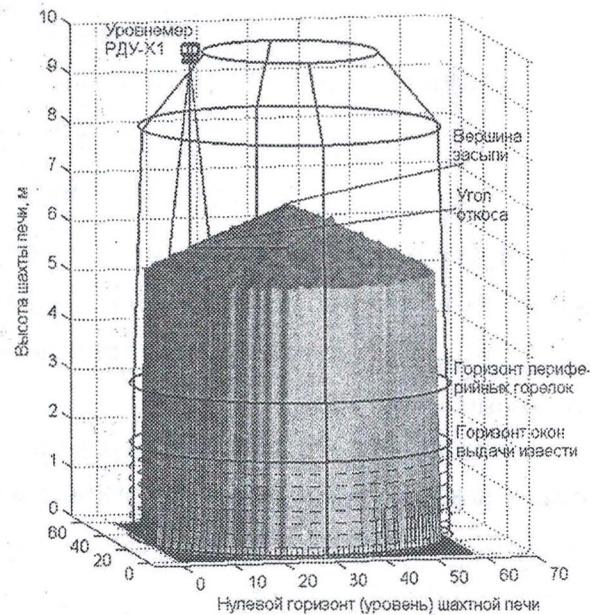


Рисунок 5 – Визуализация модели симметричного конуса засыпи

Установлено, что в диапазоне рабочих высот вершина конуса засыпи смещена относительно центра печи в пределах 0,18 м ($\sim 2...3d_k$), а каркас засыпи представляет собой практически симметричный конус (рис. 5).

Выводы и перспективы дальнейших исследований

На основе анализа множества факторов разработана и реализована на ПЭВМ каркасная математическая модель формообразования поверхности, в которой учтены направление движения потока материала в процессе загрузки, конструктивные особенности печного агрегата и корректировка

геометрических параметров засыпи в печи (высоты и угла откоса) по данным радиолокационного зондирования поверхности. Модель позволяет определять углы откоса в области радиолокационного зондирования поверхности, высоту засыпи в центральной части, на периферии, а также в любой радиальной координате в указанном сечении печи.

Путем экспериментальных исследований на модели получена динамика значений углов откоса засыпи α по мере заполнения шахты, определяемых в области проекции радиолуча уровнемера на наклонную поверхность конуса засыпи. При этом максимальное отклонение последовательно рассчитанных значений α не превышает 5° , что является допустимой ошибкой при измерении углов откоса кусковых материалов в шахтной печи.

Уточнение параметров моделируемой формы засыпи выполнено с учетом действительных значений углов откоса засыпи, полученных в ходе промышленных экспериментов на объекте.

Разработка каркасной модели засыпи ориентирована на решение задачи рационализации теплообмена в шахтной известково-обжиговой печи путем управления загрузкой сырья и выгрузкой готовой извести.

Перспектива использования компьютерного моделирования процессов формообразования поверхности применительно к доменным печам с использованием радарных уровнемеров состоит в получении информации не только об окружной неравномерности уровня шихты в периферийной, промежуточной и центральной областях колошника, но и о величине углов откоса в этих областях, что также существенно повысит наблюдаемость технологического процесса доменной плавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков В.И. Теория и практика загрузки доменных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.
2. Бочка В.В. Повышение эффективности выплавки чугуна на основе новых технологий загрузки и управления ходом доменной печи : дисс. на соискание науч. степени доктора техн. наук : 05.16.02 / В.В. Бочка. – Днепропетровск, 2000. – 371 с.
3. Аввакумов С.И. Распределение и перераспределение шихты по окружности колошника доменной печи / С.И. Аввакумов // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – Выпуск №2 (23). – Донецк, 2011. – С. 234-238.
4. Тригуб И.Г. Исследование влияния формы поверхности засыпи известняка на показатели работы шахтной печи / И.Г. Тригуб, С.С. Федоров, С.Н. Форись, В.И. Головки // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1 (66). – Дніпропетровськ, 2010. – С. 133-143.
5. Тригуб И.Г. Определение угла откоса поверхности сыпучих материалов в металлургических агрегатах с применением радарной техники / И.Г. Тригуб, В.П. Радченко, О.Н. Кукушкин // Сборник научных трудов НГУ №17, том 1. – Днепропетровск: РИЦ НГУ, 2003. – С.470-474.