

УДК 669.162.283

В.И. Большаков, И.Г. Муравьева, Е.А. Белошапка, И.Е. Варивода**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИХТЫ В ДОМЕННЫХ ПЕЧАХ**

Приведен обзор существующих отечественных и зарубежных математических моделей радиального распределения шихты при использовании бесконусного загрузочного устройства.

Оптимизация распределения шихты в доменной печи является важным средством достижения высокой производительности при минимальном расходе кокса и увеличении длительности межремонтных периодов работы. Характер распределения шихтовых материалов по радиусу колошника доменных печей, оснащенных бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ) лоткового типа, определяется уровнем засыпи, видом и массой загружаемых материалов, режимом работы лотка (скорость и направление вращения, углы наклона, программа их изменения), а также расположением компонентов шихты на конвейере и в бункерах загрузочного устройства. Анализ существующих моделей распределения показал, что в мире наиболее широко распространены модели контроля и расчета радиального распределения шихты на печах большого объема, оснащенных БЗУ. Известные модели радиального распределения, как правило, жестко привязаны к конкретному объекту и требуют существенной переработки для использования на других доменных печах. Структура, состав и математическое описание этих моделей существенно отличаются и изменяются в зависимости от решаемых задач и используемых разработок.

Модель распределения шихтовых материалов должна учитывать режим формирования многокомпонентных порций на шихтоподаче, их трансформацию при загрузке в бункеры БЗУ и выгрузке в доменную печь (ДП), движение частиц в газовом потоке колошникового пространства, их распределение на поверхности засыпи, перераспределение материалов, движение при опускании столба шихты и формирование зоны плавления в доменной печи. Однако такой полной модели, воспроизводящей, с достаточной достоверностью, описанные процессы сегодня не существует. Основные проблемы создания подобной модели:

1. отсутствуют надежные способы и средства контроля гранулометрического и физико-химического состава шихтовых материалов при их выгрузке из расходных бункеров шихтоподачи;

2. недостаточно изучены процессы перераспределения гранулометрического состава по сечению слоев на конвейере и в потоке шихтовых материалов при загрузке их в бункеры загрузочного устройства (ЗУ), в газовом потоке колошникового пространства и при течении материалов по откосам поверхности засыпи;

3. отсутствует математическое описание процессов движения и перераспределения шихтовых материалов по гранулометрическому и химическому составу при их разгрузке;

4. недостаточно материалов и результатов исследований особенностей образования и изменения слоев шихты в работающей ДП (распределение компонентов в смешанных порциях, перераспределение кокса после выгрузки на него порции железосодержащих материалов);

5. нет достоверного, проверенного экспериментально описания и моделей формирования и изменения при различных режимах работы печи зоны плавления и других элементов структуры столба шихтовых материалов в печи.

По назначению и использованию математические модели радиального распределения шихты могут быть разделены на несколько категорий, которые накладывают существенные ограничения и на структуру моделей, на объем памяти, необходимый темп работы, а также на состав, гибкость и структуру основных блоков этих моделей. Выделим следующие типы моделей:

- *Исследовательские модели*, предназначенные для эксплуатации в лабораторных условиях. Цель создания таких моделей – исследование процессов загрузки шихты, оценка различных технических решений, развитие, совершенствование и оценка математических моделей. Эти модели не связаны оперативно с работой реального объекта, они должны быть достаточно гибкими, трансформироваться для решения широкого круга технических задач на разных печах с использованием различных конструкций системы загрузки.

- *Оперативные модели*, предназначенные для инженерных расчетов и выбора параметров и программ загрузки технологическим персоналом доменного цеха. Эти модели предназначены для решения четко ограниченного в техническом задании круга задач, обеспечиваются базой данных, соответствующей условиям работы данного доменного цеха и конструкций системы загрузки доменной печи. Они должны учитывать особенности формирования распределения шихты при типичных нарушениях хода печи (периферийный, центральный ход) и при использовании различных приемов управления распределением шихты.

- *Модели, предназначенные для работы в составе САК доменной печи*. Эти модели сейчас целесообразно применять в комплексе с системами измерения профиля засыпи шихты на колошнике ДП, чьи показания могут быть использованы в качестве исходных данных для моделирования структуры слоев материала в вертикальном сечении и для расчета технологических показателей и параметров.

Среди зарубежных моделей, наиболее известна и совершенна математическая модель «Профиль» фирмы АО «Тиссен сталь» («THYSSEN STAHN AG»). К особенностям этой модели следует отнести:

- Скорость схода шихты по радиусу задается в абсолютных единицах (см/мин) в соответствующих точках радиуса и пересчитывается программно в относительные единицы, либо задается в относительных единицах. Скорость схода шихты может быть задана кусочно–линейной функцией. На основе заданного распределения скоростей схода шихты, рассчитывается опускание слоев материала на колошнике и в шахте печи как сход полигона (фигуры) или движения потоков.

- Допускается задание углов откоса материалов к оси α_1 и периферии печи α_2 . Причем угол откоса на периферии α_2 может быть постоянным или задаваться в зависимости от используемого в верхней позиции угла наклона лотка.

- Предусмотрено только равномерное деление массы порции по угловым положениям лотка.

- В модели, для расчета движения шихтовых материалов в печи используются траектории движения шихты в колошниковом пространстве. При стандартной длине лотка 3,5м используются траектории, полученные экспериментально на стенде фирмы П. Вюрт. В случаях, когда длина лотка существенно отличается от стандартной, как на ДП–5 «Северстали», где установлен лоток длиной 5м, фирма запросила траектории у заказчика. В этой модели использованы траектории, рассчитанные ИЧМ [1].

- Исходный профиль и слои материалов в печи для заданного цикла рассчитываются путем итерации. Сначала исходный профиль считается горизонтальным и на него выгружаются и рассыпаются слои материала. Такой расчет выполняется несколько раз (n итераций цикла) и после каждой итерации сравниваются величины смежных профилей. Когда максимальная разность высот соответствующих профилей становится меньше заданной, расчет заканчивается. Объем материалов после рассыпания по кольцевым зонам колошника должен быть равен объему загруженных материалов цикла. При счете без итерации возможны ошибки: потеря слоя, большие недостачи по объему материала.

- Моделируется сегрегация материала в кольцевых зонах колошника. В качестве исходных данных для сегрегации используется фракционный состав порций шихтовых материалов. При моделировании сегрегации выгруженный слой делится на три зоны: периферийная, зона траектории и осевая. Первая и третья зоны – зоны рассыпания материала. Вторая зона – зона траектории – принята шириной 0,6 м. При моделировании сегрегации считается, что в первой и второй зонах грансостав соответствует среднему граносоставу порции. В направлении осевой зоны наблюдается наибольшая сегрегация, так как здесь происходит течение материала по откосу. Предполагается, что на границе со второй зоной соотношение мелкой и средней фракции такое же, как и во второй зоне, а у оси печи мелкие фракции отсутствуют. Распределение мелких фракций в слое ведется по линейному закону.

- Возможность моделирования загрузки материалов как от периферии от оси печи, так и в обратном направлении.
- При изменении уровня засыпи соответственно изменяется распределение шихты по радиусу колошника печи.
- Учитывается опускание материалов в коническую часть шахты печи.

По результатам расчета модели «ПРОФИЛЬ» проверяются изменения построенного профиля материала и углы откоса верхнего слоя. При существенно неравномерном распределении скоростей схода шихты перед загрузкой следующей порции может происходить пересыпание материала по исходному слою, однако должен сохраняться предельный угол откоса.

В модели «ПРОФИЛЬ» заложены результаты исследований как собственно фирмы «Тиссен сталь» (расчет профиля материала с учетом насыпания по поверхности засыпи), так и алгоритмы и модели других исследователей. Авторы модели: Peters K.H., Kreibich K., Mülheims K., Bachhofen H. J.

Математическая модель фирмы «Тиссен сталь», кроме подсистемы «Профиль», включает следующее: модель определения количества газа в каждом кольцевом сечении шахты с оценкой предельной степени его использования в этих зонах и в целом по печи, определение границ зоны плавления, расчет расхода топлива (кокса) по кольцевым зонам и в целом по печи. Однако широкого применения эта математическая модель на металлургических комбинатах стран СНГ и зарубежья не получила.

В работе немецких исследователей [2] описана модель распределения масс потока шихтовых материалов при сходе с лоткового распределителя БЗУ. Как указано в работе, ширина ссыпавшегося с вращающегося желоба материала зависит от угла установки желоба и, независимо от вида материала, достигает максимума при 34 град. Причина этого, по мнению исследователей, заключается в том, что попадающий на желоб материал, в зависимости от угла установки желоба, подпрыгивает или сыпается. Материал, который подпрыгивает на желобе, движется в направлении продольной оси желоба, часть его, под действием силы Кориолиса, оттесняется к боковой стенке желоба. При угле меньше 34 град. преобладает его сыпание. В переходной области, где одновременно наблюдаются оба вида движения материала, поток материала состоит из двух по-разному движущихся частей потоков с соответственно большей общей шириной. Анализ движения шихты по ребристому вращающемуся лотку выполнялся ранее и описан в работах отечественных ученых [1, 3].

Количественное распределение по радиусу в горизонтальном сечении струи показано на рис.1.

Распределение масс материала в сечении потока исследовалось и в работах отечественных ученых [4, 5] на Новолипецком металлургическом комбинате. В результате экспериментальных исследований были получены похожие распределения масс по сечению потока, однако, резкого из-

менения поведения потока материалов при угле наклона распределителя 34 град обнаружено не было.

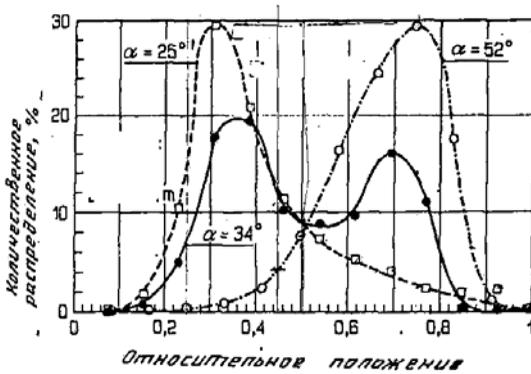


Рис. 1. Количественное распределение материала в падающей струе при различном угле установки вращающегося лоткового распределителя шихты (точка замера 180 град., материал — агломерат, уровень засыпи — 2м, длина лотка — 3,0м).

Особенностям движения шихтовых материалов на колошнике ДП и в колошниковом пространстве до встречи с поверхностью засыпи посвящена работа [6] чешских ученых. В этой работе, как и во многих других исследованиях, движение потока шихтовых материалов было упрощено до движения одной частицы, т.е. не учитывалось взаимодействие частиц. В модели учтено влияние вида материала, размера частицы материала, угла наклона лотка, частоты вращения, скорости движения потока колошникового газа и точки падения материала на распределительный лоток на траектории движения материала до поверхности засыпи. Модель [6] использовалась для расчета положения гребня материала из конкретно углового положения лотка. Для расчетов профиль поверхности засыпи принимался горизонтальным.

Математическая модель радиального распределения шихты на колошнике, разработанная фирмой «ИТАЛСИДЕР», исходя из параметров загрузки, точек падения, состава шихты и физических свойств шихтовых материалов (объемная плотность, угол естественного откоса), дает возможность получить на выходе следующие параметры: диаграмму радиального профиля каждой подачи, тенденцию изменения объема каждого компонента шихты (в процентах) и рудной нагрузки по радиусу, тенденцию изменения газопроницаемости шихты по радиусу. Модель также определяет следующие параметры распределения шихты: процентный объем кокса в центре, процентный объем кокса на периферии, радиус окружности, ограничивающей центральную зону, занятую только коксом, если таковая имеется, увеличение коксового показателя в центральной части поперечного сечения, увеличение площади, занятой коксом. Однако, в зарубежных публикациях практически отсутствует информация о методах, применяемых для моделирования распределения шихтовых материалов на колошнике ДП, а также об использовании результатов моделирования для оперативного управления загрузкой.

В СССР первая полномасштабная модель контроля загрузки шихты в ДП, оснащенную лотковым БЗУ, была реализована в 1982 году учеными ВНИИА Чермета и ИЧМ на ДП-6 НЛМК [4, 5].

Математическим моделированием распределения шихтовых материалов на колошнике ДП также занимались и японские исследователи [7–10]. В работе [8] описана методика создания математической модели распределения шихты по радиусу ДП, а также результаты экспериментальной проверки модели и возможности ее применения. Модель была разработана для оценки распределения шихты при выгрузке ее в ДП при помощи лоткового БЗУ. В ней учтены внутривспечные параметры, действующие на распределение шихты. Допущения, принятые в модели:

- рассыпание шихты по поверхности засыпи формируется последовательным наслоением предполагаемых единичных объемов шихтовых материалов, на которое разбивается общая подача материала (разделенная по числу оборотов лотка);
- сегрегация по размерам зерен слоев, насыпаемых из предполагаемых единичных объемов, происходит только в радиальном направлении, а по высоте не происходит;
- распределение масс шихтовых материалов внутри потока, сходящего с лоткового распределителя шихты принято пикообразным и симметричным, с максимальной массой на центральной линии;
- вершина пика насыпного слоя не соответствует точке падения шихты, она обычно смещена к стенке печи;
- при загрузке железорудной части шихты на кокс до 2-го оборота лотка обрушение кокса не происходит;
- при загрузке руды на третьем обороте лотка поверхностный слой кокса у стенок печи и на промежуточном участке обрушивается, сползая к оси печи, а руда самотеком доходит до промежуточного участка и образует слой;
- разделение выгруженных слоев материала по крупности частиц в радиальном направлении изменяется в зависимости от количества выгруженного материала за каждый оборот лотка и толщины насыпанного слоя, скорости газового потока и т.п.;
- сползание мелкой фракции материала к центру печи прямо пропорционально ускорению сползания под действием нагруженных сверху слоев.

Моделирование профиля поверхности засыпи, образованного при выгрузке шихтовых материалов в ДП идет в четыре этапа.

1. Единичный объем железосодержащих материалов насыпается в точку падения, которая представляет собой точку пересечения траектории падения с вращающегося лотка (линия, проходящая по оси падающего потока) с поверхностью ранее выгруженного слоя. Конфигурация поверхности слоя кокса перед насыпанием железосодержащих материалов опре-

деляется с учетом изменений, связанных с распределением скорости газового потока и распределением скорости опускания шихты. Распределение скорости газового потока и скорости опускания шихты представляется результатами измерений, полученных в ДП.

2. Под действием массы выгруженного железорудного слоя в слое кокса наступает состояние, при котором, по предположению авторов, возникает дугообразная поверхность скольжения, а при новом насыпании слоя с первичной конфигурацией, когда соблюдаются условия перераспределения кокса (величина коэффициента безопасности, рассчитанного для этой поверхности скольжения достигает предельного значения) происходит его сдвигка. Областью сдвигки считается область, ограниченная дугообразной поверхностью скольжения, по которой происходит перемещение кокса к центру печи под углом, соответствующем углу внутреннего трения кокса.

3. При перераспределении кокса к оси печи происходит перераспределение рудных масс в промежуточных областях. Также происходит пересыпание материала на поверхности засыпи в соответствии с углом естественного откоса материала.

4. Выполняется расчет распределения размеров частиц по радиусу печи для каждого оборота распределительного лотка. С использованием этого распределения частиц рассчитывают распределение скорости газового потока при насыпании каждого слоя, и корректируют профиль поверхности засыпи в соответствии со скоростями газа. Далее производится корректировка профиля поверхности засыпи с учетом относительных скоростей опускания шихты.

Такая оценочная модель была применена на ДП–1 в Муроране. Данные по распределению скоростей схода шихты и газового потока брались из САК загрузки. С целью облегчения съема исходных данных для моделирования были заранее рассчитаны относительные скорости газовых потоков.

Модели [9, 10] рассматривают процесс разрушения подложки кокса при выгрузке на него железосодержащих материалов с использованием «теории обвала», который учтен в общей математической модели формирования поверхности засыпи по радиусу колошника ДП. Согласно этим моделям, устойчивость наклонной поверхности скольжения определяется силой среза, действующей на этом откосе, и его силой сопротивления. Слой кокса перемещается, если коэффициент скольжения меньше 1. Скольжение кокса происходит по дуге. Была предпринята попытка применить разработанную модель к действующим доменным печам и получены соответствующие экспериментальные значения коэффициента скольжения и степени устойчивости слоя кокса на наклонной поверхности. Для применения модели сдвигки кокса наибольшую сложность составляет определение радиуса дуги его скольжения. В работе [10] приводятся средние значения угла откоса для кокса в промежуточных зонах до

и после выгрузки железосодержащих материалов. Согласно материалам работы [9], явление обрушения находится в гораздо большей зависимости от давления, насыпаемой на слой кокса руды и сопротивления слоя кокса, чем от массы выгруженной руды и силы ее удара о поверхность засыпи. Основные принципы моделей [9, 10]:

- масштабы сдвижки слоя кокса зависят от режима загрузки, влияющего на конфигурацию наклонной поверхности слоя кокса;
- количество смещенного кокса изменяется в диапазоне 4–16 объемных % от общего количества загруженного кокса;
- состояние насыпи кокса после перераспределения зависит от распределения по радиусу печи скорости опускания шихты и скорости газа;
- явление сдвижки кокса представляет собой плоское скольжение под действием груза руды (как и в работе [8]).

Следует также отметить модель польских исследователей [11], которая основана на следующих допущениях: скорость схода шихты вниз известна, уровень шихты в процессе загрузки одной подачи не изменяется, угол наклона поверхности шихты зависит только от вида материала и принятой скорости схода шихты, сегрегация зерен материалов не учитывается.

В модели [11] разность схода шихты учитывается путем выбора соответствующего угла наклона основания, т.е. профиля шихты перед загрузкой следующей порции. Вычисление профиля шихты заключается в определении формы сечения последовательных колец, для чего используется метод простых итераций. Результатом применения модели является количественное определение распределения материалов на колошнике.

В работе [12] описывается модель радиального распределения шихтовых материалов, которая учитывает формирование в оси смешанного слоя (кокс + железосодержащие материалы) в процессе перераспределения кокса при выгрузке на него рудной части шихты. В этой модели также рассчитывается скорость схода шихтовых материалов по радиусу ДП в соответствии с технологическими параметрами доменной плавки.

Модель [13] позволяет определить распределение шихтовых материалов по всему сечению ДП с учетом газопроницаемости слоев шихтовых материалов в сухой и вязкопластичной зонах, теплового перераспределения между фазами и стенками печи. Результаты моделирования хорошо согласуются с показаниями микроволнового профилемера. Смешанная порция (агломерат + окатыши) выгружается как дополнительный вид материала с механическими и химическими свойствами агломерата и окатышей в долях их участия в формировании смеси. В этой модели также учитывается сегрегация материала при его выгрузке с лотка. Результаты исследования сегрегации различных видов материала приведено в работе [14]. Согласно этим исследованиям распределение средних частиц как агломерата, так и кокса по сечению потока является равномерным, тогда

как распределение крупных и мелких частиц в радиальном сечении потока приближается к синусоидальной форме.

Среди существующих отечественных моделей радиального распределения шихтовых материалов в ДП [3], можно выделить три базовых модели. Они отличаются методическими подходами, объемом используемой информации, структурой и содержанием математического аппарата и особенностями представления выходной информации.

Модель ВНИИАЧермет, внедренная на ДП-9 «Криворожсталь» и ДП-6 НЛМК отличается наибольшим объемом входной информации, получаемой непосредственно с печи. Она включает расчет траекторий движения частиц по методике ИЧМ с учетом характеристик шихты и газового потока [1, 3, 15] и замкнутый расчет распределения объема выгружаемой порции на исходный профиль засыпи с учетом рассыпания, работает в темпе процессом загрузки печи. Достоверность результатов расчетов с использованием этой модели определяется рядом упрощающих предположений, используемых при расчете исходного профиля, отсутствием результатов прямого измерения профиля и распределения скоростей схода шихты по радиусу колошника и недостаточно надежным контролем при помощи электромеханических зондов опорных точек исходного и конечного профилей поверхности засыпи при загрузке очередной порции. На основе модели, внедренной на ДП-6 НЛМК, позднее разработана САК загрузки для ДП-3 «Азовстали». Одной из особенностей модели на ДП-6 НЛМК было включение в ее состав блока расчета траекторий движения шихты в газовом потоке колошникового пространства. Опыт ее использования показал, что расчет траекторий в темпе с процессом обеспечивает некоторое уточнение расчетов, так как позволяет оперативно учитывать изменения дутьевого и газодинамического режима работы печи, однако при этом существенно усложняется модель [3]. На практике удобнее использовать пакет из нескольких рассчитанных заранее траекторий для разной интенсивности дутья и использовать их в готовом виде.

Разработанная в ДМетИ математическая модель загрузки печи лотковым ЗУ позволяет получать количественные характеристики распределения компонентов шихты по сечению печи [16]. В качестве входных параметров модели используются: вид загружаемых материалов (агломерат, окатыши, кокс); масса порций отдельных компонентов шихты; насыпная масса и углы откоса материалов; угловые положения лотка, при которых загружается в печь каждая порция материала; уровень засыпи; скорость опускания шихтовых материалов по радиусу печи; число и ширина кольцевых зон, для которых определяются количественные характеристики распределения; число и последовательность порций компонентов шихты в цикле; время загрузки порций шихты в печь; размеры колошника печи; основные размеры ЗУ и характеристика режима работы лотка. Выходными параметрами модели являются: значения рудных нагрузок в кольцевых зонах сечения колошника; профиль поверхности засыпи материалов после

загрузки цикла порций; эпюра толщин слоев кокса и железорудных материалов в вертикальном сечении печи для цикла порций шихты.

Во всех отечественных и ряде зарубежных моделей используются траектории движения шихты по лотку загрузочного устройства и в газовом потоке колошникового пространства после схода с лотка, рассчитываемые по модели ИЧМ путем решения системы дифференциальных уравнений [1, 15]. В модели, запрограммированной на вычислительном комплексе ДП-9, [16], траектории аппроксимированы полиномами в соответствии с результатами расчета, выполненного в отделе машиноведения ИЧМ [15].

Точка встречи потока материалов с поверхностью шихты определяется координатой, совпадающей с радиусом печи, на котором траектория движения шихты пересекается с линией профиля засыпи. За профиль засыпи на первой итерации принимается обычно прямая линия, а на последующих итерациях – ломаная линия, получающаяся в результате расчета профиля шихты на предыдущей итерации, с учетом влияния режима загрузки и распределения скоростей опускания шихты по радиусу печи. Влияние формы задаваемого исходного профиля на результаты расчетов практически исчезает уже на второй–третьей итерациях.

Основные положения модели:

- После встречи с поверхностью шихты, сыпавшийся с лотка материал образует вокруг оси печи фигуру вращения, имеющую в вертикальном сечении многоугольник ABCDEF (рис.2). Координаты точек A и C определяются путем последовательных приближений из условия, что объем образовавшейся фигуры вращения равен объему порции загруженного материала.

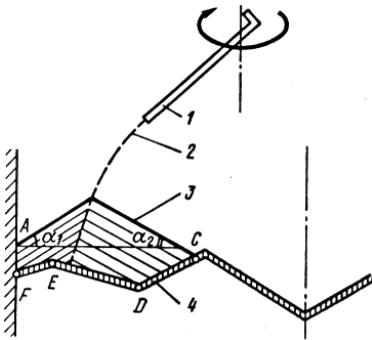


Рис. 2. Схема расположения на колошнике порции шихты, загружаемой в печь вращающимся лотком: 1 – лоток загрузочного устройства; 2 – траектория потока шихты; 3 – новый профиль поверхности шихты; 4 – исходный профиль поверхности засыпи.

- Углы α_1 и α_2 задаются для каждого из загружаемых материалов.
- Расчеты проводятся для всех частей порции материала, загружаемых в печь при разных угловых положениях вращающегося лотка. Определяется, сколько материала данного вида попало в каждое из кольцевых сечений, и рассчитывается их сход в шахту ДП на заданный уровень засыпи по оси опускания зондов.
- Процесс расчета длится до тех пор, пока не будет исчерпан весь цикл загрузки.

В конце цикла определяются рудная нагрузка в отдельных кольцевых сечениях и окончательная форма профиля засыпи. В модели загрузки, разработанной для ДП–9, предусмотрена возможность контроля формы профиля засыпи также и после загрузки каждой из порций материала.

Модель ИЧМ, испытанная на ДП–9 комбината «Криворожсталь» внедрена на ДП–6 НЛМК и в САУ ДП–5 ОАО «Северсталь» [3], отличается тем, что при расчете распределения рудных нагрузок и объемов шихты по радиусу колошника используются рассчитанные, с учетом газового потока, траектории движения шихты и фактические данные о работе лоткового распределителя. Разработка этой модели началась в 1974 г. с создания методики расчета траекторий движения шихты в газовом потоке колошникового пространства для конусной загрузки. В 1980 г. создана модель движения частиц по лотку и далее в колошниковом пространстве. В 1984г. она была дополнена алгоритмом распределения шихты на поверхности засыпи. В 1995г. разработка этой модели была завершена с уточнением принятых допущений на основе проведенных исследований и модельных расчетов и созданием модели радиально–окружного распределения шихты, позволяющей учесть окружную неравномерность, возникающую при использовании лоткового распределителя шихты. В настоящее время модель радиального распределения шихты усовершенствована с учетом новых знаний и результатов исследований, и реализована на ЭВМ с использованием современных информационных технологий. Моделирование распределения рудных нагрузок и объемов шихты по радиусу колошника в этой модели основано на предположении о том, что каждая часть порции шихты укладывается только в ту кольцевую зону, в которую ее направляет лотковый распределитель, и не перемешается в соседние зоны. Использование фиксируемых показателей работы лоткового распределителя шихты определили широкое применение этой модели для управления загрузкой. Важной особенностью этой модели, отличающей ее от других является ее реверсивность, т.е. она позволяет как контролировать загрузку по заданной программе, так и определять программу по заданному распределению шихты.

Основное назначение модели радиального распределения шихты – расчет и оценка параметров распределения шихтовых материалов по радиусу колошника ДП как для существующих, и для новых программ загрузки, оценка влияния на распределение шихты и выбор рациональных конструктивных и режимных параметров работы БЗУ.

С учетом вышеизложенного, выделим следующие требования к математической модели распределения шихтовых материалов на колошнике ДП:

1. класс математической модели – исследовательская модель (для применения в лабораторных условиях);

2. учет истечения шихтовых материалов (особенно смесей) при выгрузке их из бункеров, т.е. последовательность выгрузки слоев материала на колошник;

3. расчет движения материалов по лотковому распределителю шихты от места падения до точки схода с определением параметров схода материала;

4. расчет траекторий движения материалов в колошниковом пространстве для базовых параметров дутьевого режима;

5. учет уровня засыпи материала по двум зондам или профиля по диаметру с расчетом относительной скорости схода материала по радиусу колошника (лучше по данным профилемера);

6. моделирование процесса перераспределения кокса при выгрузке на него железосодержащих материалов;

7. формирование структуры выгруженных слоев материала в продольном сечении.

Исходными данными для модели являются:

- геометрические параметры ДП: диаметр и высота колошника, угол наклона образующей шахты печи;

- геометрические и кинематические параметры БЗУ: длина, радиус сечения лотка, высота стенки лотка, высота подвеса и угловая скорость вращения распределителя, количество рабочих угловых положений и угол наклона лотка в каждом положении, диаметр центральной трубы БЗУ и ее смещение относительно оси подвеса лотка;

- характеристики шихтовых материалов (кокса, агломерата, окатышей): насыпные веса и плотность, коэффициенты сопротивления движения по поверхности лотка, углы откоса, распределение массы материала по сечению потока, сходящего с лотка, размер основных фракций;

- параметры колошникового газа (давление, температура, скорость).

Выходными данными модели радиального распределения шихты являются:

- радиальное распределение масс, объемов материалов и рудных нагрузок в кольцевых зонах колошника;

- распределение толщин слоев материалов по радиусу;

- профиль поверхности засыпи и картина укладки слоев материалов по радиусу и высоте печи при загрузке цикла порций с учетом смещения поверхности кокса под действием веса выгруженной на кокс рудной порции и опускания материалов печи с заданным распределением скоростей схода по радиусу.

Радиальное распределение материалов в модели рассчитывается для заданного числа равновеликих кольцевых зон колошника, соответствующих числу рабочих угловых положений распределителя БЗУ. Модель радиального распределения шихты предполагает усредненное по окружно-

сти радиальное распределение материалов, одинаковое во всех секторах окружности колошника. Кроме интегральных характеристик распределения материалов на колошнике, модель радиального распределения шихты позволяет рассчитать:

- характеристики движения отдельной частицы потока материала по распределителю;
- скорость, угол поворота сечения потока относительно оси лотка;
- угол вылета частицы при сходе с лотка;
- траектории потока в колошниковом пространстве;
- радиусы падения на поверхность засыпи;
- ширину потока;
- высоту встречи со стенкой колошника.

Эти характеристики используются для выбора конструктивных и режимных параметров распределителей БЗУ (длины, рабочих угловых положений распределителя).

Радиальное распределение шихты моделируется для любой заданной программы загрузки и режимов работы ЗУ ДП, выгрузки и распределения шихтовых материалов при движении их по трактам ЗУ, распределителю и в газовом потоке колошникового пространства до поверхности засыпи. Моделируется движение материала от шихтового затвора по наклонной течке и центральной трубе до поверхности лотка; движение по вращающемуся распределителю и сход с его поверхности; полет в противотоке колошникового газа и падение на поверхность засыпи; движение и распределение материала по поверхности засыпи; опускание материалов в печи с учетом заданного радиального распределения скорости схода шихты.

Основные допущения, принятые в модели:

1. Для формирования профиля поверхности засыпи за цикл загрузки в качестве исходного принимается ровный профиль поверхности засыпи. Построение реального профиля поверхности засыпи за цикл загрузки происходит за счет 4-х кратного повторения процесса построения профиля поверхности засыпи, так как принято, что профиль стабилизируется на 3-м – 4-м повторении.

2. Принимается, что за время выгрузки одной порции не происходит существенного схода шихтовых материалов.

3. После окончания выгрузки, слой материала опускается до уровня засыпи, достижение которого определяется расстоянием поверхности материала в периферийной зоне от технологического нуля.

4. Расчет траекторий движения шихтовых материалов в колошниковом пространстве выполняется с учетом заданных дутьевых параметров.

5. Скорость материала в точке его падения на лоток принимается нулевой.

6. Не ведется расчет траекторий полета материала в колошниковом пространстве при пересыпании его через борт лотка, а выдается лишь диагностическое сообщение.

7. Процесс перераспределения кокса происходит при выгрузке железосодержащих материалов на кокс при достижении углом откоса профиля критических значений.

Структурная схема модели приведена на рис. 3.

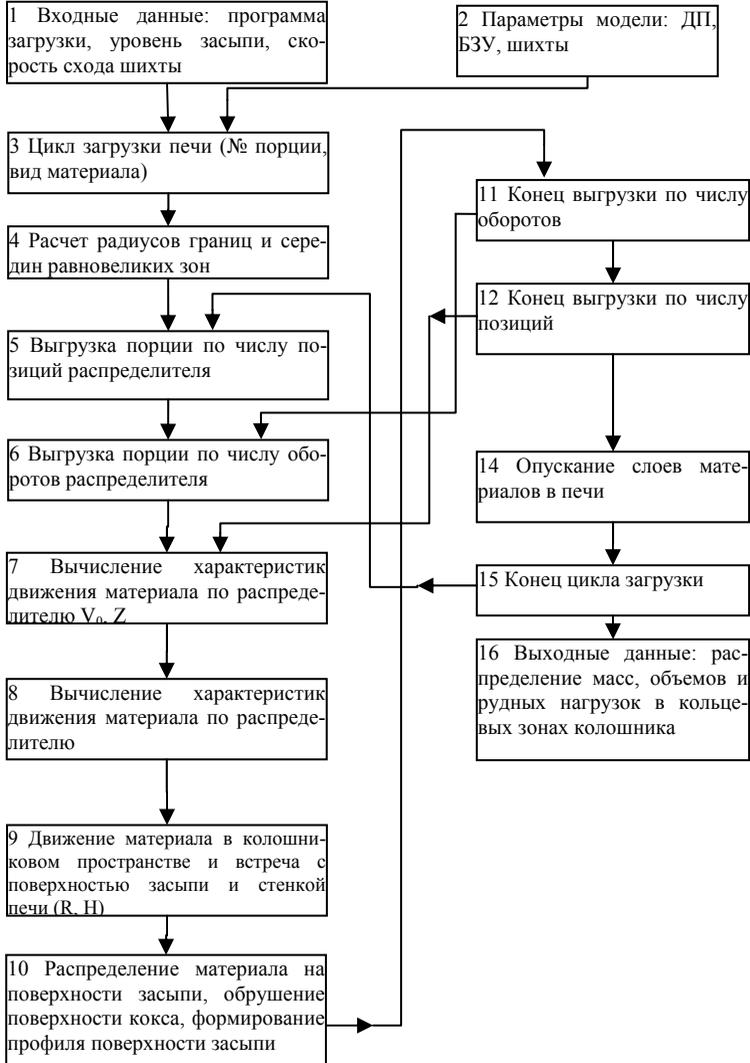
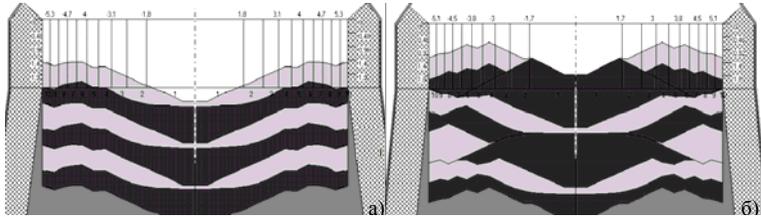


Рис.3. Структурная схема модели радиального распределения шихты

Результаты моделирования представлены на рис.4 (а, б).



Условные обозначения:

■ – железосодержащие материалы; ■ – кокс; ■ – исходный профиль.

Рис. 4. Модельное распределение материалов по радиусу колошника доменной печи: а) ДП–5 ОАО «Северсталь»; б) ДП–9 ОАО КГМК «Криворожсталь».

Программы загрузки:

№ программы	Ур. зас	№ порции	материал	позиции лотка								
				9	8	7	6	5	4	3	2	1
а)	1,3 м	1	кокс	–	6,00	6,00	6,00	6,00	8,50	–	–	–
		2	агломерат	25,00	25,00	24,00	22,00	19,00	15,00	–	–	–
		РН		8,33		4,0	3,67	3,17	1,76	–	–	–
б)	1,2 м	1	кокс	–	4,29	4,76	4,33	5,03	4,78	–	–	–
		2	агломерат	12,78	14,80	15,40	14,71	15,25	17,69	16,73	–	–
		3	кокс	–	–	–	–	–	–	7,14	7,37	5,93
		4	агломерат	21,12	28,64	29,15	16,98	–	–	–	–	–
		5	кокс	–	6,06	5,82	6,42	5,00	–	–	–	–
		6	агломерат	13,15	14,63	15,11	15,45	17,86	15,39	16,73	–	–
		7	кокс	–	–	–	–	–	–	7,25	7,4	8,83
		8	кокс	–	4,16	4,66	4,19	4,25	3,8	–	–	–
		9	агломерат	–	20,4	21,73	25,21	22,07	20,92	–	–	–
РН		8,65		5,34	4,84	3,86	6,29	0,64				

Разработанная в ИЧМ математическая модель применяется для расчета распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи для типовых программ загрузки ДП–5 ОАО «Северсталь» и ДП–9 АО КГМК «Криворожсталь». Для проверки адекватности моделирования была проведена корреляция распределения рудных нагрузок по радиусу колошника доменной печи с распределением измеренного содержания CO_2 в колошниковом газе. В результате такой проверки, проведенной в ИЧМ при анализе результатов моделирования, получено, что для программ загрузки, типичных для комбината ОАО «Северсталь» коэффициент корреляции составил в среднем 0,8, тогда как для программ загрузки, типичных для «Криворожстали» – всего 0,65. Такой разбег коэффициентов корреляции обусловлен изменением распределения CO_2 по радиусу печи при выгрузке различных порций материала в рамках сложной программы цикла загрузки, что подтверждают исследования, проведенные ИЧМ на «Криворожстали». В этих исследованиях производились замеры состава колошникового газа через короткие интервалы времени. В результате измерений было установлено, что содержание CO_2 в колошниковом газе существенно изменяется после выгрузки очередной порции материалов.

Заключение. Моделирование распределения шихты на колошнике является неотъемлемой частью инструментария для исследования движения газов, химических реакций и теплообмена, параметров зоны плавления. Современные модели используются для выбора рациональных режимов работы печи с целью достижения максимальной производительности при минимальном расходе кокса и увеличения длительности межремонтных периодов.

Математическое моделирование распределения шихтовых материалов по радиусу колошника необходимо для определения структуры столба шихты в шахте доменной печи, и его изменений при различных режимах работы, расчета толщины слоев и распределения частиц в слое по виду материала и по крупности, распределения рудных нагрузок и порозности слоя по радиусу и окружности колошника. Цель моделирования – исследование процессов загрузки шихты, оценка различных технических решений, совершенствование управления ходом печей и математических моделей.

Модели и получаемые с их помощью результаты должны трансформироваться для решения различных технических задач на печах разного объема с использованием различных конструкций системы загрузки. Модели радиального распределения такого назначения должны принадлежать к классу исследовательских моделей. Модели, предназначенные для работы в составе АСУТП доменной печи, необходимо выполнить в комбинации с профилемерами, они должны включать моделирование процесса плавки и определять оптимальные управляющие воздействия с использованием методов искусственного интеллекта.

1. *Методика* расчета параметров схода шихты с распределительного лотка / В.И.Большаков, А.Ю.Зарембо, А.С.Сало // Вопросы производства чугуна в доменных печах/МЧМ СССР (ИЧМ). – М.: Металлургия, 1984. – С.60–64.
2. *Влияние* на симметрию распределения материалов в доменной печи при применении засыпного аппарата с вращающимся желобом / Л.Кройц, Х.В.Гуденау, Н. Штандиш // Черные металлы. – 1991. – №3. – С.26–32.
3. *Большаков В.И.* Теория и практика загрузки доменных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 256 с.
4. *Контроль* распределения шихты на колошнике и в шахте доменной печи / А.А.Гришкова, М.М.Френкель, Т.М.Новикова, В.И.Большаков и др.// Проблемы автоматизированного управления доменным производством. ЦНИИТЭИ приборостроения. – ТС–12, вып. 6. – М. – 1983. – С. 48–49.
5. *Результаты* внедрения алгоритма «Траектория» в составе АСУ загрузки доменной печи / В.И.Большаков, А.Ю.Зарембо, А.А.Гришкова // Автоматизация технологических процессов и управления производством в черной металлургии. МЧМ СССР. – М.:Металлургия, 1987. – С. 30–33
6. *Уyušiti matematickeho modelu pchybu vsákových surovin v bessvonové sasebně.* / V.Krčec , L.Broš//Hutnické liety. – 1978. – V.33. – №7. – P.466–471.
7. *Влияние* газового потока на распределение шихты на колошнике доменной печи и их взаимодействие// Тецу–то–хагане. – 1978. – Т.78, № 4. – С. 29–31.
8. *Разработка* математических моделей для оценки распределения шихты в условиях безконусной загрузки в доменной печи/ Е.Окуно, С.Маудзак, К.Кунимото, М.Исояма и др.// Тецу–то–хагане. – 1987. –Т 73, №1. – С. 91–98.
9. *Развитие* математической модели распределения под действием нагрузки с разрушением слоя кокса/ Е.Камисака, Е.Окуно, Т.Ирита, С.Маудзак, Т.Исояма, К.Кунимото// Transaction ISIJ. – Vol.24. – 1984. – P.327.
10. *Влияние* явления обрушения слоя кокса на распределение шихты на колошнике доменной печи/ Е.Окуно, К.Кунимото, Т.Ирита, С.Маудзак // Перевод №29/87 по журналу «Тецу–то–хагане». – 1986. – V.72, №7. – С.75–82.
11. *Modelowanie* rozkladu wsadu w gardzieli wielkiego pieca/ L. Król, W. Żymła // HUNTIK. – 1979. – №11. –P.437–440,
12. *Application* of Simulation model for burden distribution to actual operations/ Y.Kajiwara, T.Jimbo, A.Kometani, Y.Shimoda// Transaction ISIJ. – 1984. – V.24, №5. –P.379–386
13. *A blast furnace model* to optimize the burden distribution/ G.Danloy, J.Mignon, R.Munnix, G.Dauwels, L.Bonte// Ironmaking conference processing. – 2001. –P.37–48
14. *Калинин А. П.* Математические модели движения шихты и ее распределения на колошнике доменной печи// Ит–т «Черметинформация», (обзорн. информ., сер.: Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу в производстве чугуна). – М., 1990. – Вып.4. –С.1–32.
15. *Траектории* движения шихты в колошниковом пространстве современной доменной печи/ В.И.Большаков, А.Ю.Зарембо // Черная металлургия. Бюл. инта Черметинформация. – 1985. – Вып.20. – С.35–37.
16. *Автоматизированный* выбор режима загрузки доменной печи с загрузочным устройством/ А.К.Тараканов, Н.Ш.Гринштейн, М.Н.Байрака, И.Е.Почекайло, А.Г.Ульянов, В.И.Большаков// Сталь. – 1986. – №5. – С. 11–16.

Статья рекомендована к печати к.т.н. Н.М.Можаренко