

УДК 51-74

Чохонелидзе Александр Николаевич

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»
Россия, Тверь¹
Доктор технических наук, профессор
a444595@pochta.ru

Браун Аквей Виллилам

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»
Россия, Тверь
Аспирант
Ганский университет технологии
Преподаватель
wbrownacquaye@hotmail.com

Форгор Лемпого

ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет»
Россия, Тверь
Аспирант
Ганский университет технологии
Преподаватель
forlempe@yahoo.co.nz

Разработка матричной модели замкнутой схемы измельчения цемента

¹ 170024, Тверь, проспект Ленина, 25

Аннотация. В этой статье разрабатывается модель замкнутой схемы измельчения в шаровой мельнице, имеющей сепаратор с высоким КПД, на заводе по производству цемента. Исследуются различные существующие подходы к разработке таких моделей и предлагается новая. На основании принципа материального баланса и стохастического представления движения частиц в системе измельчения и с помощью матриц измельчения и классификации представлена модель цепи Маркова для схемы, состоящей из шаровой мельницы и сепаратора с высоким КПД. Матрица измельчения рассчитана с помощью функций отбора и дробления, а классификационная матрица определена по кривой Тромпа сепаратора. Результаты полевых экспериментов, проведенных на опытном цементном заводе, использованы для определения параметров модели. Ретроспективные технологические данные, относящиеся к работе опытной схемы измельчения, применены для проверки модели и определения ограничивающих условий процесса.

С помощью численного моделирования определены взаимосвязи между управляемыми (загрузка сырья; размер отсека сепаратора) и наблюдаемыми (характеристики крупности цемента; производительность; удельный расход энергии) параметрами схемы.

Ключевые слова: управление; матриц измельчение; клинкер; контур помола цемента; промышленный процесс; матриц классификация; модель; моделирование.

Измельчение представляет собой типовой технологический процесс и относится к механическим процессам. Отсюда следуют основные подходы к моделированию измельчения как технологического процесса

Основными подходами к моделированию измельчения как технологического процесса являются:

- Энергетический подход.
- Статистический подход.
- Механико-кинетический подход.

При энергетическом подходе к моделированию измельчения связываются все энергетические затраты на необратимые процессы в сложной физико-механической системе внутри аппарата для измельчения [2,3,4] с изменением дисперсности материала.

При статистическом или статистико-эмпирическом подходе на основании данных экспериментов с использованием регрессионного и дисперсионного анализа выделяют параметры, оказывающие наиболее значительное влияние на критерий качества. Основным недостатком этого метода является невозможность экстраполяции результатов.

При механико-кинетическом подходе процесс сокращения крупности рассматривается как последовательность актов разрушения, причем исходным материалом каждого такого акта является продукт предыдущего [1,4]. Чем продолжительнее период измельчения, тем больше таких актов и выше степень сокращения крупности. В матричной модели измельчения продолжительность акта разрушения отлична от нуля. В кинетической модели процесс рассматривается как непрерывный и характеризуется скоростью уменьшения крупности.

При механико-кинетическом подходе возможна дискретизация модели по времени и по крупности или только по времени, и по крупности [6,8].

Кинетические модели процесса измельчения

Кинетические модели процесса измельчения основаны на уравнениях баланса масс, описывающих процесс в различных интервалах размеров. Если предположить, что мельница совершенно смешивает в радиальном направлении и частично смешанных в осевом направлении, кинетическая модель второго порядка дано в [10] в виде:

$$\frac{dw_i(l,t)}{dt} = -S_i w_i(l,t) + \sum_{j=1}^{i-1} S_j b_{ij} w_j(l,t) + D_i \frac{d^2 w_i(l,t)}{dl^2} - u_i \frac{dw_i(l,t)}{dl}, \quad (1)$$

t - время измельчения;

l – Пространственной координаты в осевом направлении;

$w_i(l,t)$ - массовая фракция материала в i -й класс размера;

b_{ij} - функция дробления

S_i - функцией отбора

D_i - коэффициент перемешивания

u_i - скорость конвективного переноса частиц в осевом направлении.

Левая часть уравнения (1) представляет собой вариацию массовой фракции материала в размер класса i в течение временного интервала $[t, t + \Delta t]$. Первый и второй член в правой части представляют собой массу исчезающие, и проявляющие частиц в этом классе, соответственно. Третий член описывает осевой дисперсии и последний член представляет собой конвективный перенос частиц в осевом направлении со скоростью интерфейса. Дифференциальное уравнение (1) имеет следующие граничные условия [10,13]:

$$w_i(l, 0) = f_i(l), \quad (2)$$

$$w_i(l, t) = -u_i w_i(l, t) - D_i \frac{dw_i(l, t)}{dl} \text{ для } l = 0 \quad (3)$$

$$\frac{dw_i(l, t)}{dl} = 0 \text{ для } l = L \quad (4)$$

где $f_i(l)$ является массовой долей подачи в классе размера i и L это длина мельница.

Уравнение (1) с условиями (2) - (4) представляет собой основной кинетической модели процесса. В зависимости от конкретных условий работы мельницы, различные варианты этой модели, также известны. Наиболее часто, совершенно смешанная модель используется в предположении, что заряд тщательно перемешивают и равномерное как в радиальном и осевом направлении. В этом случае, третий и четвертый член в (1) можно пренебречь, и кинетики измельчения описывается в виде. [11, 12, 14]

$$\frac{dw_i(l, t)}{dt} = -S_i w_i(l, t) + \sum_{j=1}^{i-1} S_j b_{ij} w_j(l, t) \quad (5)$$

Матричная модель замкнутой схемы измельчения

Матричная модель замкнутой схемы измельчения основан на базовых понятий теории цепей Маркова.

Когда он используется в системах измельчения, теория обеспечивает эффективный математический аппарат, позволяющий эффективную вычислительную анализ процессов измельчения и классификации [5,12,13].

Цепь Маркова использует вероятностные методы в представлении моделируемого процесса. Если X – это переменная, принимающая случайные величины y_1, y_2, \dots, y_m , то формальное определение цепи Маркова определяется как:

$$P(X_{m+1} = y_{m+1} | X_1 = y_1, \dots, X_m = y_m) = P(X_{m+1} = y_{m+1} | X_m = y_m) \quad (6)$$

Согласно выражению выше, утверждается, что, учитывая все предыдущие значения y_i переменной X , где индекс $i = 1, 2, \dots, m$, при этом m обозначает текущее значение, будущее значение y_{m+1} определяется только по последнему известному, т.е. текущему, значению переменной X , y_m .

Дискретные цепи Маркова

Согласно теории дискретных цепей Маркова наблюдаемое свойство делится на дискретные интервалы конечного числа n . Интервалы называются состояниями системы. Все возможные состояния, f_i образуют пространство состояний задачи, и множество их вероятностей образует вектор состояния F , размера $n \times 1$.

$$F = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

При применении цепи Маркова для моделирования процессов измельчения моделируются вариации свойств измельченных частиц. Если количество частиц велико, f_i можно интерпретировать как относительную часть (массу) частиц, принадлежащих i -ому состоянию. Следовательно, вероятности состояния f_i можно представить функцией вероятности плотности $f(x)$, или частотным гранулометрическим составом.

Период наблюдения за ходом процесса также можно разделить на конечные интервалы времени Δt , и текущее время можно представить в виде последовательности дискретных значений. Непрерывный поток времени заменяется на последовательность положительных целых чисел k , и, таким образом, переменные модели цепи Маркова становятся дискретными.

$$t_k = \Delta t \cdot k \quad (8)$$

Где:

t_k – дискретное представление времени,

Δt – продолжительность перехода,

k – последовательность положительных целых чисел (1, 2, 3 и т.д.)

Кроме дискретизации непрерывных физических параметров, описанный подход позволяет выбрать размер «элементарного объема» модели, что определяет точность моделирования, а также время расчета. Элементарный объем можно получить из экспериментальных эксплуатационных данных.

Матрица переходных вероятностей

В k -ого перехода, между время t_k и t_{k+1} , вектор состояния F_k переходит в F_{k+1} . Это означает, что свойство частиц проходит от одного интервала к другому и каждый переход имеет свою собственную вероятность произойти. Корреляция между F_k и F_{k+1} может быть описан формулой матрицы:

$$F_{k+1} = PF_k, \quad (9)$$

где:

P – матрица переходных вероятностей.

Матрица P является основным оператором модели цепи Маркова. Она содержит переходные вероятности, которые определяют возможность одного отдельного состояния перейти в другое.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1j} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2j} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{i1} & P_{i2} & \dots & P_{ij} & \dots & P_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nj} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Входное значение P_{ij} , матрицы P показывает вероятность перехода состояния j в состояние i . Исходя из присущего вероятностного характера матрицы, ее входные значения P_{ij} должны удовлетворять двум условиям:

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \text{ и } \sum_{i=1}^n P_{ij} = 1 \text{ для } \forall j \quad (11)$$

Если матрица перехода P зависит от времени и постоянна для всех переходов, последовательное использование уравнения (9) опишет процесс эволюции, начиная от начального вектора состояния F_0 . Это случай линейного Марковского процесса, который непосредственно применяется в моделировании измельчения и может быть представлен как:

$$F_k = P^k F_0 \quad (12)$$

Матрица измельчения

До получения матрицы измельчения должны быть определены векторы состояния F , всех материальных потоков в цикле. На рис.1 показаны типичная схема тонкого измельчения и места отбора проб всех основных материальных потоков.

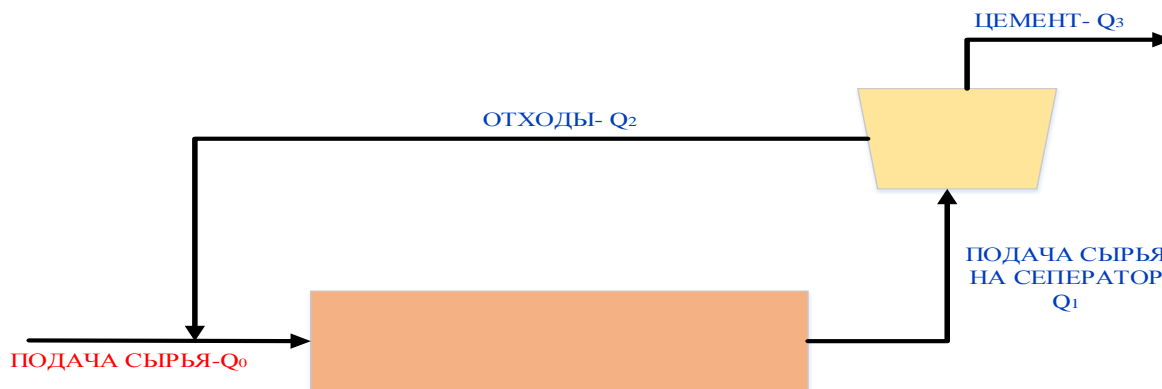
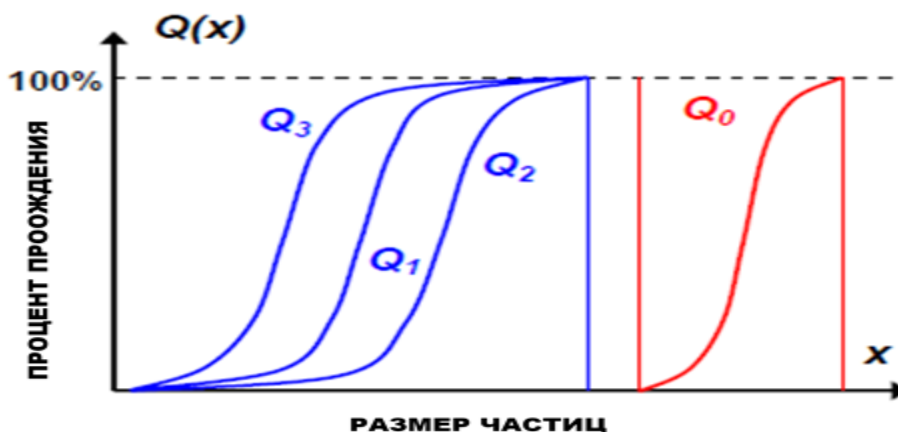


Рис. 1. Типовые места отбора проб закрытой схемы измельчения (разработано авторами)



*Рис. 2. Гранулометрический состав материала
 (разработано авторами)*

Гранулометрический состав свежего загружаемого материала намного крупнозернистее, чем состав материальных потоков вокруг сепаратора. В действительности, свежая загрузка не может пересекаться с другим материалом в цепи, как показано схематически на рисунке 2, используя суммарное распределение прохождения материала в процентах. Кроме того, три сепараторных потока достаточно тонкие, чтобы подвергаться лазерному гранулометрическому анализу, в то время как гранулометрический состав свежей загрузки, как правило, получают, используя набор стандартных сит.

Описанный эффект требует использования сит разных размеров для определения гранулометрического состава в цикле измельчения. Для того, чтобы преобразовать все гранулометрического состава данных один и тот же набор сит, вычислительный сита должны быть введены.

Состав матрицы измельчения

Матрица измельчения G , является частным случаем матрицы перехода, P . Ее получают на основании того, что процедура измельчения происходит путем элементарных шагов, представляющих случаи размола. Один такой случай соответствует одному переходу цепи Маркова, как описано в уравнении (9).

Повторяющийся процесс измельчения соответствует уравнению (12), представляющему переходы вектора состояния за определенный период времени. Элементы матрицы измельчения определяются с помощью функций отбора и распределения размола.

Матрица измельчения определяется как:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & b_{12}s_2\Delta t & b_{13}s_3\Delta t & \dots & b_{1n}s_n\Delta t \\ 0 & 1-s_2\Delta t & b_{23}s_3\Delta t & \dots & b_{2n}s_n\Delta t \\ 0 & 0 & 1-s_3\Delta t & \dots & b_{3n}s_n\Delta t \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-s_n\Delta t \end{bmatrix} \quad (13)$$

Матрица G – верхняя треугольная матрица. Диагональные входные значения определяют значения вероятности необходимые для того, чтобы частицы оставались в пределах своих исходных фракций. Частицы самой мелкой фракции не ломаются и их

вероятность остаться в составе фракции равна $100\% (G_{11} = 1)$. Значения в верхнем углу матрицы представляют собой функцию распределения и определяют вероятность перехода частицы из исходной фракции (столбец матрицы) в конечную (строка). Значения в нижнем углу матрицы нулевые при отсутствии агломерации, связанной с процессом измельчения.

Аналогично уравнению (9), отдельный случай измельчения выражается формулой:

$$[F_0]_{k+1} = [G][F_0]_k \quad (14)$$

Здесь подстрочный индекс в скобках обозначает поток материала (свежая загрузка), а подстрочный индекс за скобками, k и $k+1$, относится к переходу вектора состояния F_0 . Подставляя (7) и (13) в уравнение (14), количество материала фракции i , полученного после одного перехода, можно рассчитать, как:

$$f_i^{(k+1)} = f_i^{(k)} - f_i^{(k)} s_i \Delta t + \sum_{j=1+1}^n f_j^{(k)} b_{ij} \cdot s_j \Delta t \quad (15)$$

В этой формуле первый член – исходное количество материала во фракции i , второй член – это количество, которое покинуло фракцию после измельчения, и третий член – это количество материала, которое фракция i получила из фракций большего размера в результате соответствующего измельчения и распределения материала по фракциям меньшего размера. Аналогично уравнению (12), вектор состояния, определяющий гранулометрический состав материала на выходе из мельницы, можно рассчитать с помощью (14):

$$[F_1] = [F_0]_k = [G]^k [F_0]_0, \quad (16)$$

где:

$[F_1]$ – вектор состояния потока загрузки на сепаратор,

$[F_0]_k$ – вектор состояния свежей загрузки после k -го перехода,

$[G]^k$ – результат k умножений (переходов) матрицы измельчения,

$[F_0]_0$ – начальный вектор состояния свежей загрузки.

Прямо пропорционально времени, количество переходов k , можно интерпретировать как время пребывания в трубчатой шаровой мельнице. Действительно, чем дольше материал остается внутри мельницы и чем больше количество переходов, тем тоньше получающийся в результате продукт измельчения.

Матрица классификации

Следуя пути потока материала внутри фактической цепи помола, вектор состояния, представляющий материал, выходящий из мельницы F_1 , направляется в матрицу классификации, которая моделирует разделение материала на мелкие и крупные фракции.

Динамический сепаратор замкнутой цепи мельницы представлен диагональной матрицей классификации C , каждый элемент которой C_i , показывает относительную часть фракции i , переходящей в реальный материальный поток классификация (конечный продукт).

Матрица классификации является результатом дискретизации кривой КПД (ГЕС) сепаратора. Ее размер определяется количеством элементов (фракций) вектора состояния

$n \times n$. Кривую КПД (обратную кривой Тромпа) можно рассчитать, используя измеренные данные потоков сепаратора о гранулометрическом составе.

Кривая КПД затем преобразуется в набор вычислительных решет с помощью уравнения (3.2) и, в дискретной форме, почленно, присваивается элементам матрицы классификации C .

$$C = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & C_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

Если данные о размере частиц на сепараторе не доступны, аналитическое описание кривой КПД возможно для расчета матрицы классификации. Следующее выражение дает адекватное представление кривой КПД динамического сепаратора:

$$GEC = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{x_{50}}\right)^\xi}, \quad (18)$$

где:

x – размер фракции, мкм,

x_{50} – крупность, мкм,

ξ – параметр калибровки.

Крупность x_{50} , можно определить аналитически для различных типов сепараторов. Ее определение основано на физике процесса разделения и учитывает законы аэродинамики, объединяя геометрическую конфигурацию зоны разделения, скорости потока газов и вращения ротора, плотность газа и классифицируемый материал, а также кинематическую вязкость газа.

В отличие от измельчения, процесс разделения, как предполагается, происходят в течение одного перехода цепи Маркова. Есть два материальных потока, полученных в результате процедуры классификации. Гранулометрический состав для них обоих, тонкоизмельченный продукт F_3 , и отбракованный крупнозернистый материал F_2 , рассчитываются по матрице C .

$$[F_3] = [C][F_1] \quad (19)$$

$$[F_2] = ([I] - [C])[F_1], \quad (20)$$

где:

I – единичная матрица, все диагональные элементы которой равны 1.

Учитывая уравнения (16), (19) и (20), все векторы состояния замкнутой схемы помола F_1, F_2 и F_3 можно определить для стационарного режима работы схемы с помощью вектора состояния F_0 , который представляет собой непрерывную постоянную подачу свежего сырья.

Матричная модель замкнутой схемы измельчения

Ниже представлены матрично-ориентированные модели всей схемы помола, включая матрицы измельчения и классификации. С помощью принципа баланса массы, матрицы перехода отдельных единиц оборудования объединены в один блок матрицы в соответствии с их функциями и пути материала по схеме.

Метод можно применять к произвольному количеству циклов измельчения и классификации, действующих в схеме, и, по сути, он не ограничивается моделированием только для процессов измельчения.

Построение матрицы схемы

Добавление нового элемента в замкнутый цикл измельчения на рис. 3.1, который поглощает частицы продукта, выходящие из сепаратора, поможет разделить все частицы по их гранулометрическому составу в схеме, в том числе частицы конечного продукта. Также, и только в этом разделе, будет немного изменено подстрочное индексирование материальных потоков между мельницей и сепаратором в целях облегчения конструкции модели. Закрытая схема помола с новыми условными обозначениями для построения матричной модели показана на рисунке 3.

Как видно из рисунка, элементы схемы нумеруются следующим образом: мельница – 1, сепаратор – 2, коллектор продукта – 3. Материальные потоки, представленные векторами состояния, F , имеют подстрочную индексацию элемента схемы, в который они направляются. Таким образом, вектор состояния гранулометрического состава материала на входе в мельницу обозначен как F_1 , сепаратор – F_2 , и коллектор продукт – F_3 . Вектор состояния, представляющий подачу свежего сырья, остается F_0 .

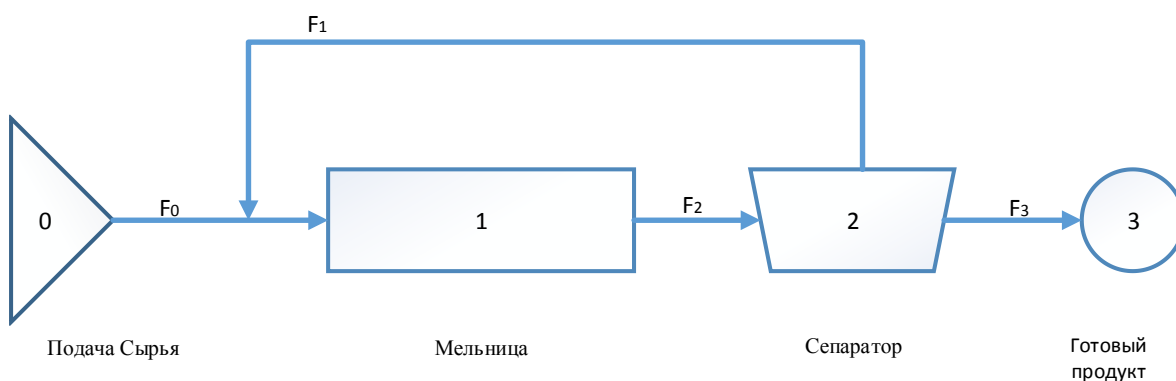


Рис. 3. Матричная модель замкнутой схемы измельчения
(разработано авторами)

Матрица схемы M , построена с использованием набора правил, полученных для схем, состоящих из произвольного количества элементов и конфигураций:

- Каждый столбец матрицы M соответствует элементу схемы. Матрица вероятностей перехода элемента помещается в столбце.
- Матрица вероятностей перехода мельницы G , находится в строке с номером элемента, куда направлен выход из мельницы.

- Матрица вероятностей перехода классификатора C , размещается в строке с номером элемента, куда направляется тонкоизмельченный продукт классификации, а матрица $(I - C)$ находится в ряду с номером элемента, куда направляется грубоизмельченный продукт классификации.

Аналогично для других матриц вероятностей перехода, определенных ранее, матрица M описывает переходы частиц от исходного элемента схемы (номер столбца) в элемент получателя (номер строки).

$$M = \begin{bmatrix} 0 & I - C & 0 \\ G & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Матрица M является блочной матрицей с числом блоков, соответствующих количеству элементов в схеме измельчения (3×3). Полный размер развернутой матрицы M определяется количеством элементов схемы, умноженной на номер рассматриваемой фракции гранулометрического состава, т.е. $(3n \times 3n)$ для схемы, изображенной на рисунке 3. Последний столбец матрицы M содержит только нулевые блочные матрицы, т.к. абсорбированные частицы конечного продукта безвозвратно покидают схему.

Численное стационарное решение

Для того, чтобы использовать матрицу M в расчетах цепи Маркова, необходимо построить инклюзивный вектор состояния, содержащий все векторы состояния всех элементов в схеме.

Такой инклюзивный вектор получают путем размещения векторов состояния элементов в вектор блока столбца.

$$F^M = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где:

F^M – вектор состояния блока столбца,

F_i – вектор состояния размера $n \times 1$.

Вектор состояния подачи сырьевого материала, F_0^M , подобен вектору F^M и содержит массовые доли, которые добавляются в схему после каждого перехода. Однако, для схем, показанных на рисунке 3, он содержит только один ненулевой блочный вектор из трех, что предлагается и представляет собой вектор гранулометрического состава F_0 потока подачи свежего сырьевого материала.

$$F_0^M = \begin{bmatrix} F_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Для упрощения итераций матрицы необходимо выбрать элементарное время перехода Δt равным времени пребывания частиц в мельнице. Тогда, поток материала внутри мельницы можно представить в виде режима идеального вытеснения и все частицы будут проходить

через мельницу за один переход цепи Маркова. Поскольку время пребывания частиц в сепараторе, как правило, значительно короче, чем в мельнице, такой же подход будет применяться для перехода частиц через сепаратор.

Для выбранного периода перехода Δt и определенных матриц G и C матрицу M можно построить и использовать для вычисления последовательных эволюций вектора состояния F^M как

$$[F^M]_{k+1} = [M]([F^M]_k + [F_0^M]_k) \quad (24)$$

Уравнение (24) можно переписать, чтобы выявить элементы матриц и показать присущие им отношения баланса масс.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 0 & I-C & 0 \\ G & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 + F_0 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} (I-C)F_2 \\ G(F_1 + F_0) \\ C \cdot F_2 \end{bmatrix}_k, \quad (25)$$

где:

F_0 – подача свежего сырья,

$$F_1 = (I-C)F_2 - \text{отходы}, \quad (26)$$

$$F_2 = G(F_1 + F_0) - \text{подача материала на сепаратор}, \quad (27)$$

$$F_3 = C \cdot F_2 - \text{конечный продукт} \quad (28)$$

Хотя и с несколько иной записью, уравнения (26) -(28) идентичны уравнениям (20), (14) и (19), соответственно.

Последовательная итерация уравнения (25) округляет представленную модель матрицы схемы измельчения. Для длительной непрерывной подачи сырья в схеме, существует асимптотическое решение для вектора состояния F^M , которое описывает гранулометрический состав во всех материальных потоках схемы F_1 , F_2 и F_3 для заданной подачи свежего сырья F_0 .

Используя значение скорости подачи свежего сырья B_0 , скорость потока материала, входящего на j -ый элемент схемы, можно найти как:

$$B_j = B_0 \sum_{i=1}^n f_{ij}, \quad (29)$$

где:

B_j – скорость потока материала в j -ый элемент,

f_{ij} – относительный размер массы i -ой фракции, входящей в j -ый элемент схемы,

n — общее число фракций гранулометрического состава в вычислительном наборе решет.

Кроме численного подхода, представленного выше, также получено аналитическое выражение для стационарного (асимптотическое) решения поглощающего процесса цепи Маркова:

$$[F^M]_{\infty} = (I - M)^{-1} [F_0^M], \quad (30)$$

где:

$[F^M]_{\infty}$ – асимптотический вектор состояния всех гранулометрических составов в схеме.

Разработанная модель цепи Маркова для замкнутого цикла измельчения позволяет определить гранулометрический состав и скорость всех материальных потоков в схеме на основе гранулометрического состава и скорости подачи свежего сырья. Матричная запись компактна и относительно легка для реализации с помощью программ, например, MATLAB.

Отбор проб и анализ гранулометрического состава материальных потоков в контуре измельчения является неотъемлемой частью определения модели цепи Маркова для конкретного процесса. Кроме того, анализ ответа сепаратора на изменения скорости вращения ротора и скорости объемного расхода воздуха важен для моделирования поведения сепаратора. Был проведен эксперимент в эксплуатационных условиях, и для различных режимов работы контура помола были получены образцы материала из разных материальных потоков.

Контур измельчения на опытном заводе

Контур помола на опытном заводе оснащен трубчатой шаровой мельницей с двумя отсеками компании «FLS» и сепаратором с высоким КПД FLS SEPAK. Данные по техническим условиям для мельницы и сепаратора, а также схема контура представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры оборудования

Шаровая мельница		Отсек	
		1	2
Внешний диаметр	[м]	3,8	
Внешняя длина	[м]	12,5	
Соотношение «Длина – диаметр»	[–]	3,29	
Внутренний диаметр	[м]	3,61	3,69
Внутренняя длина	[м]	3,64	8,13
Степень заполнения	[%]	28,4	35,0
Вес загрузки	[т]	47	142
Мощность двигателя мельницы	[кВт]	2611	
Скорость мельницы	[об/мин]	17,2	
Относительная скорость	[%]	79,3	
Воздушный поток мельницы	[м ³ /ч]	39700	
Мощность двигателя вентилятора	[кВт]	150	
Производительность	[т/ч]	60*	
Сепаратор с высоким КПД			
Диаметр кожуха	[м]	3,35	
Диаметр ротора	[м]	1,69	
Высота ротора	[м]	1,64	
Соотношение «Диаметр – высота»	[–]	1,03	
Двигатель сепаратора	[кВт]	224	
Воздушный поток в сепараторе	[м ³ /ч]	109000	
Мощность двигателя вентилятора	[кВт]	296	
Циклоны (№ × диаметр)	[м]	4 × 2,4	

Процедура отбора проб

Два регулируемых параметра сепаратора – это скорость вращения его ротора и объемный расход воздуха. При этом для того, чтобы проанализировать эффективность схемы тонкого измельчения, на опытном цементном заводе провели следующую процедуру отбора проб в условиях эксплуатации.

1. Отбор проб в материальных потоках сепаратора проводился для трех различных скоростей – номинальной, увеличенной и пониженной – при постоянной скорости потока воздуха.
2. Пробу материала получали с ленты конвейера загрузки сырья.
3. Регистрировали данные, характеризующие параметры процесса тонкого измельчения во время проведения процедуры отбора проб.
4. В архивных хранилищах данных делался запрос на расширенный список параметров процесса, характеризующих схему помола за два года.

Определение модели

Была построена модель цепи Маркова и выполнен анализ контура измельчения мельницы с использованием программного обеспечения MATLAB. Матрицы измельчения и сортировки, полученные выше, а также данные, полученные при процедуре отбора проб на опытном заводе, позволяют определить параметры модели цепи Маркова для процесса измельчения, а именно для рассматриваемого контура тонкого помола.

Данные, собранные для номинального режима, наблюдаемые в течение первого дня испытаний и характеризующиеся работой сепаратора в режиме «Нормальная скорость – Нормальный объемный расход воздуха», были использованы для определения параметров модели цепи Маркова.

Входными переменными, используемыми в этой модели, являются:

- $Q_1(x), Q_2(x), Q_3(x)$ и $Q_0(x)$ – гранулометрические составы в кумулятивной форме процента прохождения испытаний, описывающие потоки сепаратора и смесь свежей загрузки сырья;
- V_0 – скорость загрузки свежего сырья во всю схему.

Элементы матрицы помола, G , вычисляли в соответствии с уравнением (13). Функцию отбора помола определяли с помощью $s(x) = \alpha \cdot \left(\frac{x}{x_{\max}} \right)^\beta$, в то время как для функции распределения видоизменяли форму, представленную в уравнении (3.6), с целью учета трения частиц клинкера внутри мельницы.

Элементы классификационной матрицы, C , рассчитали, используя значения кривой КПД сорта частиц сепаратора. Имея матрицу классификации, определенную с помощью измеренных данных гранулометрического состава, определение модели сводится к определению следующих параметров, характеризующих матрицу измельчения, G :

- Продолжительность элементарного временного интервала, Δt , определенная в уравнении (8);
- Коэффициенты функции выбора α и β ;

- Коэффициенты пошагового распределения функции q и p ,
- Количество элементарных отсеков мельницы, представляющих время пребывания в ней частиц, k ;
- Эталонная пропускная способность, необходимая для сопоставления матрицы измельчения и наблюдаемой производительности действующей трубчатой шаровой мельницы.

Перепиывая уравнение (16) и применяя эталонную пропускную способность B_R , переходы частиц в процессе измельчения в мельнице можно описать как:

$$[F_1] = ([G]^k)^{\frac{B_R}{B_1}} [F_0], \quad (31)$$

где:

G – матрица помола,

K – количество элементарных ячеек Маркова внутри мельницы,

F_0 – вектор состояния загружаемого сырья,

F_1 – вектор состояния загрузки в сепараторе;

B_R – эталонная пропускная способность мельницы, т/ч,

B_1 – пропускная способность мельницы, вычисленная по модели, т/ч.

Первоначально, идентификационным параметрам были приписаны произвольные значения.

Так как накопления материала внутри контура измельчения не происходит, скорость загрузки сырья B_0 , должна быть равна скорости выгрузки конечного продукта, B_3 . При этом итерации модели выполнялись решением системы уравнений баланса масс (25) до тех пор, пока не были выполнены следующие критерии остановки процесса:

$$\frac{|B_3 - B_0|}{B_0} < \varepsilon, \quad (32)$$

где:

B_0 – измеренная скорость сырья схемы измельчения, т/ч,

B_3 – скорость конечного продукта, рассчитанная по модели, т/ч,

ε – уровень допуска (0,0001) на разницу между B_0 и B_3 .

Все скорости материального потока, рассчитанные по модели (B_1 , B_2 и B_3) определяли с помощью уравнения (29). Число итераций, требуемых для удовлетворения критерия остановки процесса, в уравнении (32) записывали и использовали в качестве меры сходимости модели. После первых испытаний итерации модели повторяли с целью поиска лучших параметров определения модели. Метод Монте-Карло использовали в качестве поисковой системы, поскольку лучшее решение находили с помощью метода наименьших квадратов, с помощью которого сравнивали ожидаемые показатели гранулометрического состава потоков сепаратора с измеренными:

$$Error = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n \left[f_i^{(c)}(x_j) - f_i^{(m)}(x_j) \right]^2, \quad (33)$$

где:

i – номер текущего материального потока,

j – номер текущей фракции гранулометрического состава,

$f_i^{(c)}(x_j)$ – ожидаемое содержание фракций гранулометрического состава x_j в i -ом потоке,

$f_i^{(m)}(x_j)$ – измеренное содержание фракций гранулометрического состава x_j в i -ом потоке.

Набор параметров, дающих минимальную ошибку, как в уравнении (33), соответствовал параметрам модели цепи Маркова, определенным для контура тонкого помола, работающего в условиях «Нормальная скорость – Нормальный объемный расход воздуха» (НСНВ). Удельную поверхность конечного продукта определяли с помощью:

$$Blaine = \sum_{i=1}^n \frac{6f_i}{\rho(x_{i+1} - x_i)} \ln \left(\frac{x_{i+1}}{x_i} \right), \quad (34)$$

где:

x_i -Нижний размер граница фракции i ;

x_{i+1} -Верхний размер граница фракции i .

и для ожидаемого, и для измеренного гранулометрического состава модели, Результаты удельной поверхности сравнивали и использовали в качестве дополнительного критерия проверки для идентификации модели цепи Маркова.

Измеренные и ожидаемые показатели гранулометрического состава в трех потоках сепаратора вместе с кривой КПД сорта частиц показаны на рисунке 4. В двух текстовых столбцах рисунка также представлены выявленные параметры модели. Удельная площадь и процент прохождения испытаний на размер сита в 45 мкм, определенные с помощью измеренных данных гранулометрического состава конечного продукта, даны красным цветом ниже ожидаемых параметров модели.

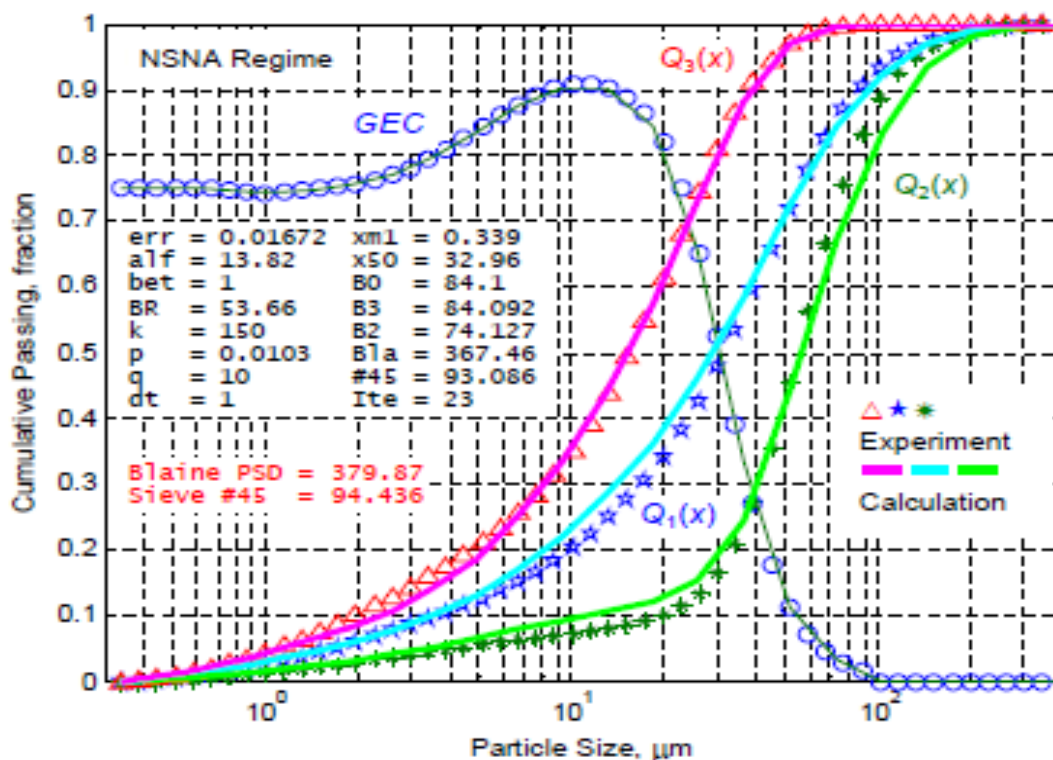


Рис. 4. Идентификация параметров цепи Марковской модели (разработано авторами)

Сокращенные обозначения, приведенные в двух текстовых столбцах вышеуказанного рисунка, обозначают следующие ожидаемые параметры модели:

• err – ожидаемая ошибка по методу наименьших квадратов
• alf – α функции выбора
• bet – β функции выбора
• BR – эталонная производительность
• k – количество отсеков измельчения
• p – пошаговая функция распределения, p
• q – пошаговая функция распределения, q
• dt – элементарный временной интервал, Δt

Как видно из данных, приведенных на рисунке 4, для моделирования процесса выбрали закон Риттингера для измельчения и, таким образом, использовали коэффициент функции выделения $\beta=1$. Было обнаружено, что число фракций, q , получающих частицы пыли из-за эффекта трения внутри трубчатой мельницы, равно 10. Вероятность передачи материала из любой фракции большей $q=10$ во фракцию пыли за один переход определили, как $p = 1,03\%$. Первое вычислительное сито совпадало с первым мерным ситом, определенным по сетке сит лазерного анализатора гранулометрического состава, и имело нулевые кумулятивные

значения прохождения испытания во всех трех значениях гранулометрического состава материальных потоков сепаратора. В ожидаемом режиме испытания потребовалось 23 итерации для достижения скорости объемного расхода воздуха в пределах 0,01% скорости загрузки сырья, что доказало быструю сходимость предложенной модели. Самую быструю сходимость достигали при $k=150$ отсекам измельчения трубчатой мельницы. Удельная поверхность в $367,5 \text{ м}^2/\text{кг}$, определенная по модели, и процент прохождения испытаний на размер сита в 45 мкм в 93.1% использовали как эталонные значения при дальнейшем моделировании режима испытаний. Для всех расчетов установили одну секунду как элементарный временной интервал Δt .

При таких параметрах, остальные режимы испытаний определялись также с помощью метода наименьших квадратов, дающего разницу между измеренными и ожидаемыми значениями гранулометрического состава потоков сепаратора согласно уравнению (33). При необходимости выполнения 14-23 итераций модель показала быструю сходимость вычислений для всех режимов испытания и позволила построить графики подобные показанному на рисунке 4 для режима «НСНВ».

Таблица 2

Ожидаемые значения удельной поверхности модели относительно измеренных значений

Режим испытаний		Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{кг}$		
Скорость сепаратора	Объемный расход воздуха	Стандарт ASTM C 204	Кривая спектральной плотности мощности, измеренная	Модель, Ожидаемая
У	У	428	393	372
Н	У	383	380	367
П	У	373	351	358
У	У	398	377	364
У	Н	378	365	
У	П	426	390	369

Значения удельной поверхности, полученные по ожидаемым в модели значениям гранулометрического состава конечного продукта, соответствовали условиям испытаний. Следует отметить, однако, что эти ожидаемые значения удельной поверхности были значительно ниже значений гранулометрического состава, измеренных лазерным анализатором, и тем более ниже измеренных значений по стандарту ASTM (таблица 2). Становится очевидным, что использование удельной поверхности в качестве параметра определения модели следует ограничить вследствие высокой изменчивости результатов, полученных различными методами оценки.

По полученным параметрам определили модель цепи Маркова для производственного процесса измельчения в определенных условиях. Параметры оставались постоянными при расчетах методом моделирования различных рабочих режимов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Линч А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление: М., Недра, 1981, 243 с.
2. Биленко Л.Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах: М., Недра, 1984, 200 с.
3. Тихонов О.Н. Задача о прогнозе влияния степени измельчения на фракционный состав обогащаемых минеральных материалов // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 1986. – № 4. – С. 8.
4. Дорохов И.Н., Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии: М., Наука, 1989, 376 с.
5. Морозов Е.Ф. К определению скорости измельчения в барабанных мельницах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых – 1980. – №2. – С. 48-54.
6. Богданов В.С. и др. Синтез и анализ уравнения кинетики при измельчении материалов в условиях поперечно-продольных движений мелющих тел // Цемент. – 1988. – № 2. – С. 13-16.
7. Николаенко А.Н., Ковальченко М.С., Брагин В.П. Изменение распределения продуктов измельчения твердых тел // Порошковая металлургия. – № 2. – 1988. – С. 6-10.
8. Kelly P.J. An empirical study of comminution in an open circuit ball mill//Trans. Can. Inst. Min. Metall. – 1970. – 7. 73. – P. 573-581.
9. Hall W.B. The mathematical form of separation curves based on two know ore parameter and a single liberation coefficient // Institution of Mining & Metallurgy Transactions. Section C.– 1970. – P. 213-221.
10. Austin L.G. Introduction to the mathematical description of grinding as a rate process//Powder Technology. – 1971. – V. 5. – №1. – P. 1-17.
11. Sanyal P., Bhattacharya S. Mathematical modeling of grinding//Journal of the Institution of Engineers (India). – 1987. – V.68, part MII. – P. 9-12.
12. Mizonov, V., Zhukov, V., and Bernotat, S. (1997). Simulation of grinding: new approaches, Ivanovo State Power Engineering University Press, Ivanovo, Russia.
13. Mizonov, V., Berthiaux, H., and Zhukov, V. (2002). Application of the theory of Markovian chains to simulation and analysis of processes with granular media, Ecole des Mines Press, Albi, France.
14. Tamir, A. (1998). Applications of Markov chains in chemical engineering, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Рецензент: Матвеев Ю. Н., профессор кафедры электронных вычислительных машин Тверского государственного технического университета, д.т.н.

Alexander Chokhonelidze

Tver State Technical University
Russia, Tver
a444595@pochta.ru

William Brown-Acquaye

Tver state technical university
Russia, Tver
Ghana technology university
Accra, Ghana
wbrownacquaye@hotmail.com

Forgor Lempogo

Tver state technical university
Russia, Tver
Ghana technology university
Accra, Ghana
forlemo@yahoo.co.nz

Development of a matrix model of a closed grinding circuits

Abstract. The article develops a model of a closed ball mill grinding circuit with a high efficiency classifier in a cement production plant. Various existing approaches for developing such models were explored and a new model was proposed. Based on a population balance principle and stochastic representation of the particle movement within the grinding system, the Markov chain model for the circuit consisting of a ball mill and a high efficiency separator was introduced through the matrices of grinding and classification. The grinding matrix was calculated with the use of selection and breakage functions, whereas a classification matrix was defined from the Tromp curve of the separator. The results of field experiments carried out at a pilot cement plant were used to identify the model parameters. The retrospective process data pertaining to the operation of the pilot grinding circuit were employed to validate the model and define the process constraints.

Through numerical simulation, the relationships between the controlled (fresh feed rate; separator cut size) and observed (fineness characteristics of cement; production rate; specific energy consumption) parameters of the circuit were defined.

Keywords: cement grinding circuit; model; ball mill; matrix of grinding; industrial processes; simulation.

REFERENCES

1. Linch A.Dzh. Cikly droblenija i izmel'chenija. Modelirovanie, optimizacija, proektirovanie i upravlenie: M., Nedra, 1981, 243 s.
2. Bilenko L.F. Zakonomernosti izmel'chenija v barabannyh mel'nicah: M., Nedra, 1984, 200 s.
3. Tihonov O.N. Zadacha o prognoze vlijanija stepeni izmel'chenija na frakcionnyj so-stav obogashhaemyh mineral'nyh materialov // Izv. vuzov. Cvetnaja metallurgija. – 1986. – № 4. – S. 8.
4. Dorohov I.N., Kafarov V.V. Sistemnyj analiz processov himicheskoj tehnologii: M., Nauka, 1989, 376 s.
5. Morozov E.F. K opredeleniju skorosti izmel'chenija v barabannyh mel'nicah // Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh – 1980. – №2. – S. 48-54.
6. Bogdanov V.S. i dr. Sintez i analiz uravnenija kinetiki pri izmel'chenii mate-rialov v uslovijah poperechno-prodol'nyh dvizhenij meljushhih tel // Cement. – 1988. – № 2. – S. 13-16.
7. Nikolaenko A.N., Koval'chenko M.S., Bragin V.P. Izmenenie raspredelenija pro-duktoy izmel'chenija tverdyh tel // Poroshkovaja metallurgija. – № 2. – 1988. – S. 6-10.
8. Kelly P.J. An empirical study of comminution in an open circuit ball mill//Trans. Can. Inst. Min. Metall. – 1970. – 7. 73. – P. 573-581.
9. Hall W.B. The mathematical form of separation curves based on two know ore parameter and a single liberation coefficient // Institution of Mining & Metallurgy Transactions. Section C.– 1970. – P. 213-221.
10. Austin L.G. Introduction to the mathematical description of grinding as a rate process//Powder Technology. – 1971. – V. 5. – №1. – P. 1-17.
11. Sanyal P., Bhattacharya S. Mathematical modeling of grinding//Journal of the Institution of Engineers (India). – 1987. – V.68, part MII. – P. 9-12.
12. Mizonov, V., Zhukov, V., and Bernotat, S. (1997). Simulation of grinding: new approaches, Ivanovo State Power Engineering University Press, Ivanovo, Russia.
13. Mizonov, V., Berthiaux, H., and Zhukov, V. (2002). Application of the theory of Markovian chains to simulation and analysis of processes with granular media, Ecole des Mines Press, Albi, France.
14. Tamir, A. (1998). Applications of Markov chains in chemical engineering, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.