

Н.С. Прядко, Г.М. Саксонов, Е.В. Терновая

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

*Аннотация. В данной работе предложена модель замкнутого цикла измельчения, основанная на основе дискретно-событийном подходе моделирования стохастических динамических процессов. Разработанный программный комплекс протестирован на результатах струйного измельчения шлаков.*

*Ключевые слова: замкнутый цикл, измельчение, фракционный состав, имитационная модель.*

**Введение.** В технологии измельчения минерального сырья для снижения энергоемкости процесса последнее время широко используются замкнутые циклы. Суть замкнутого цикла измельчения заключается в том, что из мельницы за счет движения транспортирующей среды (вода, воздух) извлекают заведомо недоизмельченный материал, который во внешнем классификаторе (гидравлические и пневматические классификаторы, циклоны, грохоты) разделяется на готовый по крупности продукт и крупный, направляемый на доизмельчение в ту же мельницу. Таким образом, уменьшается переизмельчение материала и уменьшается энергопотребление мельницы. В работе [1] разработаны схемы основных типов замкнутых циклов измельчения и установлена степень влияния гранулометрического состава измельчаемого материала на производительность мельницы.

Цель данной работы – исследование кинетики измельчения в технологической схеме замкнутого типа. Требуется оценить влияние основных технологических параметров измельчения (динамики загрузки материала, времени измельчения, исходного фракционного состава, требуемой дисперсности) на показатели производительности. Для достижения цели исследования решались следующие задачи.

1. Построение имитационной модели взаимодействия технологического оборудования в заданной схеме измельчения.

2. Проведение экспериментов, сбор и анализ статистики поведения модели на основании проведенных экспериментов.

3. Разработка предложений по повышению эффективности измельчения.

Процесс измельчения минерального сырья в замкнутом цикле рассматривается как динамическая система. Под динамической системой понимают объект или процесс, для которого однозначно определено понятие состояния как совокупности некоторых величин в данный момент времени, и задан закон (эволюция), который описывает изменение начального состояния с течением времени и позволяет по начальному состоянию прогнозировать будущее состояние динамической системы [2]. Выбор одного из способов описания закона эволюции задает конкретный вид математической модели соответствующей динамической системы.

Концептуальная модель исследуемой системы представлена в виде структурной схемы на рис. 1. Система состоит из одного входного потока материала (В), накопителя (Н), мельницы (М), классификатор (К), выходного потока (П). Реализация модели рассматривает движение материала во всей технологической системе при непрерывном замкнутом цикле измельчения (бункер-питатель, мельница и классификатор).

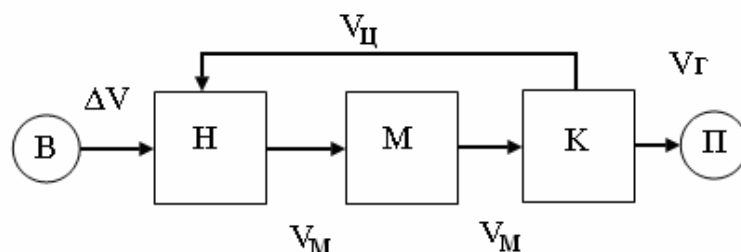


Рисунок 1 - Структурная схема модели

В модели предполагается, что поток представляет собой смесь разно фракционного сыпучего материала В, который дискретными порциями  $\Delta V$  поступает в накопитель Н через равные промежутки времени  $\Delta t$ . В течение этого промежутка времени порция материала, находящаяся в накопителе  $V_M$ , поступает в мельницу М, измельчается, и весь продукт попадает в классификатор К. В классификаторе происходит отделение некоего объема готового материала  $V_Г$ , а объем материала  $V_Ц = V_M - V_Г$  поступает в накопитель. Таким образом,  $V_M = \Delta V + V_Г$ .

Для соблюдения такого баланса предполагается что в начальный момент времени в мельнице находится объем материала  $V_m$ , т.е. первая подача объема  $\Delta V$  в накопитель осуществляется одновременно с подачей потока готового продукта  $V_g$ . Для реализации этого условия в структурную схему модели введен переключатель  $K$ , который в момент пуска модели загружает в мельницу объем материала  $V_m$ , затем переключается и в течении всего времени работы модели находится в этом состоянии. В модели также предполагается что объем материала  $V_m$ , поступающий в мельницу, должен быть постоянным и принимается равным  $V_m = k_m V_{\text{мел}}$ , где  $V_{\text{мел}}$  - объем мельницы,  $k_m$  - коэффициент загрузки мельницы, при которой процесс измельчения имеет наивысшую эффективность. Для определенности в соответствии с экспериментальными данными принимается, что  $k_m = 0.75$ .

В стационарном режиме накопитель получает объем материала  $V_g$ , одновременно генерируется подача объема  $\Delta V = k_m V_{\text{мел}} - V_g$ . Эти два объема складываются и поступают в мельницу. Таким образом, объем материала измельчаемый в мельнице всегда постоянен, а фракционный состав материала - различный.

Фракционный состав подвергается изменению в трех узлах технологической схемы: в смесителе, в который поступают два потока с различным грансоставом; в мельнице, где происходит измельчение крупных фракции; в классификаторе, в котором отделяются фракции готовой продукции. Поэтому фракционный состав материала в модели переменен и определяется коэффициентами  $k[x]_i$ , где  $[x]$  индекс участка технологической схемы, где определяется этот коэффициент, а  $i$  - номер фракции гранулометрического состава смеси. При этом  $\sum k[x]_i = 1$ .

На рис. 2 показаны соответствующие коэффициенты на различных технологических участках измельчительной установки.

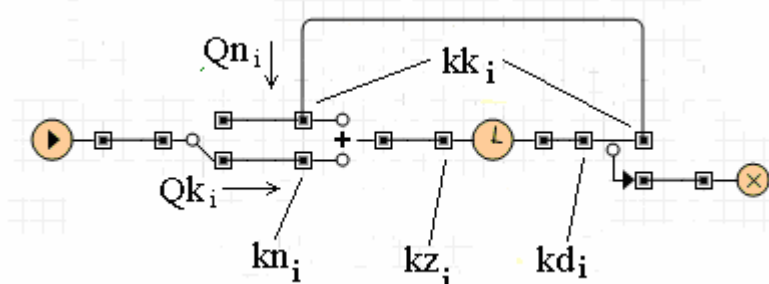


Рисунок 2 - Структурная схема модели в стационарном режиме

В начальный момент времени (в момент пуска модели) предполагается, что фракционный состав материала, находящегося в мельнице, соответствует составу поступающего потока материала и определяется матрицей коэффициентов  $kn_i$

Гранулометрический состав материала поступающего в мельницу определяется зависимостью:  $kz_i = (Qn_i \cdot kn_i + Qk_i \cdot kk_i) / \sum (Qn_i + Qk_i)$ , где  $Qn_i, Qk_i$  – расход  $i$ -й фракции с питателя и обратной ветви (циркуляционной нагрузки), соответственно;  $kn_i, kk_i$  – коэффициенты гранулометрического состава для  $i$  фракции, поступающей с питателя и обратной ветви. Гранулометрический состав материала вторичного потока материала, поступающего в мельницу после классификатора (циркулирующая нагрузка) определяется зависимостью:  $kk_i = \sum (Qn_i + Qk_i)kd_i / \sum (Qn_i + Qk_i)$

Гранулометрический состав материала, выходящего из мельницы, в данной модели определяется на основе кинетики измельчения, т.е. масса материала при измельчении за время  $\Delta t$  определяется селективной функцией измельчения  $Sij$ , которая показывает долю  $i$  фракции, разрушаемой за единицу времени. В разрабатываемой модели селективная функция задается треугольной матрицей коэффициентов измельчаемости  $a_{ij}$ , определяющих долю объема массы материала, которая переходит в результате разрушения из  $i$  фракции в  $j$  фракцию и определяется соотношениями  $kd_n = kz_1 \cdot \sum_{j=1}^8 a_{nj}$ ,  $n = 1 \dots 8$ , для определенности выбрано восемь фракций.

Матрица селективной функции имеет вид

$$\begin{matrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ a_{12} & a_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & & \\ a_{18} & a_{28} & \dots & a_{78} \end{matrix}$$

В качестве среды моделирования был выбран язык моделирования AnyLogic - инструмент имитационного моделирования нового поколения, поддерживающий концепции и средства из нескольких методов моделирования: дискретно-событийного моделирования, системной динамики и агентного моделирования [3]. Основными строительными блоками модели AnyLogic являются активные объекты, которые позволяют моделировать любые объекты реального мира.

Активный объект является экземпляром соответствующего класса, который реализуется путем создания собственных активных объектов или использованием объектов библиотек AnyLogic и заданием их взаимосвязи. AnyLogic интерпретирует создаваемые классы активных объектов в классы Java. Поэтому модель позволяет пользоваться всеми преимуществами объектно-ориентированного моделирования.

В ходе экспериментов на модели проведено варьирование параметров модели (объема загружаемого материала и циркулирующей нагрузки, времени измельчения и исходного фракционного состава и требуемой дисперсности), получены зависимости этих параметров от других параметров во времени. При этом реализован мониторинг изменения основных структурных элементов технологической схемы; характеристик гранулометрического состава на каждом элементе технологической схемы; величины потоков в отдельных ветвях технологической схемы, значения рабочего заполнения мельницы в течение всего процесса. Исследования изменения зависимости расхода исходного материала и готового продукта показал существующую зависимость производительности мельницы от загрузки мельницы и крупности исходного материала на начальном этапе измельчения. После установления стабильной работы мельницы производительность зависит при прочих равных условиях от соотношения отдельных фракций в общем объеме материала до измельчения и после него. Это позволяет разработать оптимизационные критерии управления производительностью мельницы на основе контроля объема загрузки материала и циркулирующей нагрузки в зависимости от образованной удельной поверхности материала, вычисляемой по соотношениям отдельных фракций материала.

На основе испытания модели было определено выражение для переключателя  $K$ , названного показателем переизмельчения и задаваемого отношением объема самой мелкой фракции на входе в мельницу к объему самой крупной фракции на выходе из мельницы при поступлении продукта в классификатор  $K = kz5/kd1$ . Таким образом, объем поступающего материала в мельницу определяется формулой  $V_n = K \cdot k_M V_M - V_U$ .

На рис 3. показаны результаты эксперимента по определению влияния дисперсности материала на производительность установки измельчения.

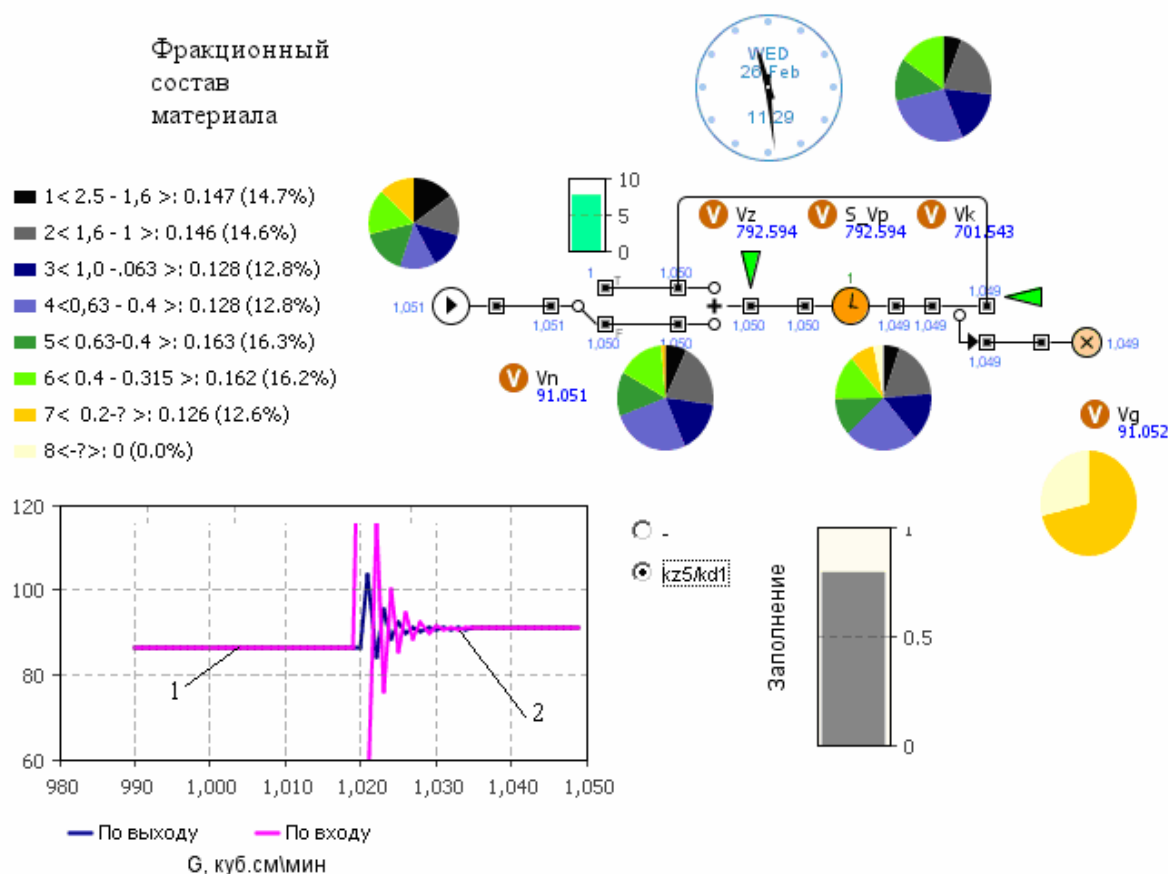


Рисунок 3 - Общий вид рабочего окна программы при испытаниях модели

На графике  $G(t)$  рис. 3 цифрой 1 обозначена производительность при  $K = 1$ , т.е. когда не учитывается влияние объема поступающих мелких фракций. После переключения на режим контроля переизмельчения, т.е. при  $K > 1$ , наблюдается повышение производительности на 5-7% при прочих равных условиях (кривая 2).

### Выводы

1. Показана возможность применения данного метода моделирования для исследования процесса измельчения в технологических схемах замкнутого цикла.

2. Данная модель описывает только кинетику фракционного состава в узлах технологической схемы замкнутого цикла. Динамика процессов в самом помольном узле должна быть рассмотрена с других позиций.

3. Данная модель может быть использована для создания системы управления технологическим процессом

4. Комплекс разрабатываемых моделей необходимо исследовать на примере работы мельниц различного типоразмера, в частности лабораторных и промышленных струйных мельницах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пилов П.И. Снижение энергопотребления в замкнутых циклах тонкого измельчения руд / П.И. Пилов, Н.С. Прядко //.- Металлургическая и горнорудная промышленность.- 2013.- вып. 6 .- С. 173 – 181.
2. Анищенко В.С. Знакомство с нелинейной динамикой: лекции сороковского профессора: Учеб. Пособие. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.-144с.
3. Киселева М. В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учебно-методическое пособие / М. В. Киселева. Екатеринбург: УГТУ - УГЛИ, 2009. 88с.