

УДК 621.926

© Е.В. Терновая, Л.В. Музыка, Е.А. Жукова

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРУЙНЫМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ

© E. Ternovaya, L. Muzyka V., E. Zhukova

IMITATION MODELING OF THE JET MILLING CONTROL SYSTEM

Цель – разработка имитационной модели системы контроля и управления процессом измельчения в замкнутом цикле.

Методика. Для моделирования кинетики гранулометрии продуктов струйного измельчения на основе теоретических и экспериментальных исследований, проведено имитационное моделирование изменения гранулометрического состава материала в ходе измельчения в среде моделирования AnyLogic. Рассмотрен замкнутый цикл измельчения с периодической подачей материала. Для создания динамической имитационной модели вместо матричной модели построена ячеечная модель измельчения. Рассмотрен случай трехфракционной смеси материала, подаваемого на струйную измельчительную установку замкнутого типа. Контрольный класс крупности является четвертой фракцией. При создании модели кинетики переходов между фракциями материала внутри мельницы используются дифференциальных уравнений, решение которых осуществляется численным методом Эйлера. Определено время измельчения для выхода контрольного класса. Установленная зависимость характеристик сигналов от размеров частиц позволяет определить необходимость загрузки мельницы.

Результаты. На основе комплексного моделирования всей системы измельчения и динамического моделирования кинетики измельчения фракций определяется необходимый выход контрольного класса. По результатам акустического мониторинга зоны измельчения определяется время измельчения для получения необходимого количества контрольного класса. Разработан алгоритм контроля дисперсности измельченного продукта. Установленная зависимость характеристик сигналов от размеров частиц, позволяет по результатам анализа сигналов рабочей зоны мельницы выявить наличие фракций материала в камере и определить необходимость загрузки мельницы, при этом исключается возможность чрезмерного измельчения или недоизмельчения материала. На базе результатов моделирования возможно управление процессом измельчения материала.

Научная новизна. Полученные результаты имитационного моделирования адекватно описывают процесс измельчения материала и могут быть использованы для управления процессом измельчения.

Практическая ценность. Результаты исследования являются базой для разработки автоматической системы управления работой струйной измельчительной установки.

Ключевые слова: струйное измельчение, имитационное моделирование, акустический сигнал, амплитуда, кинетика.

Постановка проблемы. В настоящее время для правильного подбора оборудования горно-обогачительных комбинатов и эффективного его использования широко используются различные пакеты компьютерных программ для расчета схем обогащения. С помощью моделирования можно рассмотреть множество возможных схем рудоподготовки, спрогнозировать показатели процесса

при изменении параметров работы оборудования с целью достижения нужной крупности продукта и создания системы автоматического управления процессом измельчения.

С каждым годом повышается спрос на использование тонкоизмельченных материалов в различных отраслях промышленности. При этом расширяется спектр измельчаемых материалов и требования к тонкости измельчения. Выявление особенностей измельчения того или иного материала путем прямых экспериментальных исследований процесса во всевозможном диапазоне изменений его параметров является продолжительным и дорогостоящим процессом.

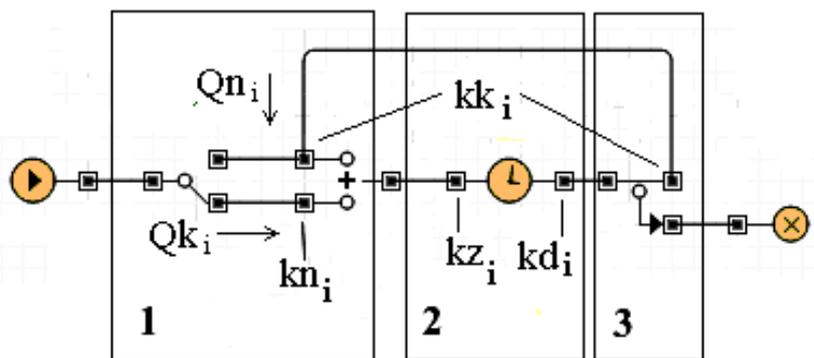
Именно поэтому возрастает роль математического моделирования, позволяющего значительно снизить требуемый объем экспериментальных исследований, необходимый для достоверного прогнозирования характеристик получаемых продуктов, тем самым уменьшить их стоимость.

Целью работы является разработка имитационной модели системы контроля и управления процессом измельчения в замкнутом цикле.

В качестве среды моделирования была выбрана среда моделирования AnyLogic – инструмент имитационного моделирования нового поколения, который поддерживает концепции и средства из нескольких методов моделирования: дискретно-событийного моделирования, системной динамики и агентного моделирования. Основными строительными блоками модели AnyLogic являются активные объекты, которые позволяют моделировать любые объекты реального мира. Активный объект является экземпляром соответствующего класса, реализуется путем создания собственных активных объектов или использованием объектов библиотек AnyLogic и задач их взаимосвязи. AnyLogic интерпретирует создаваемые классы активных объектов в классы Java. Поэтому модель позволяет пользоваться всеми преимуществами объектно-ориентированного моделирования.

Для создания динамической имитационной модели предлагается вместо матричной модели использовать ячеечную модель измельчения. В этом случае моделирование кинетики процесса измельчения рассматривается через последовательные малые промежутки времени Δt – так называемое время перехода.

Исследуется замкнутый цикл измельчения с периодической подачей материала. Поток материала представляется смесью разно-фракционного сыпучего материала, который через равные промежутки времени дискретными порциями поступает в накопитель 1.



- 1 – зона накоплення;
 2 – зона измельчения;
 3 – зона классификации

Рис. 1. Структурная схема модели в представлении AnyLogic

Порция материала, находящаяся в смесителе, поступает в мельницу 2, измельчается в течение некоторого заданного времени, после чего измельченный продукт попадает в классификатор 3. В классификаторе происходит отделение некоего объема готового материала, а недоизмельченный материал вновь поступает в смеситель. В смеситель поступает порция исходного материала, объем которого равен разнице между рабочим объемом мельницы и объемом недоизмельченного материала. Эти два объема смешиваются и вновь поступают в мельницу.

На рис. 1 показаны соответствующие коэффициенты в различных технологических узлах измельчительной установки. Гранулометрический состав материала, поступающего в мельницу, определяется зависимостью

$$kz_i = (Qn_i \cdot kn_i + Qk_i \cdot kk_i) / \sum (Qn_i + Qk_i), \quad (1)$$

где Qn_i , Qk_i – расход i -той фракции из питателя и обратной ветви (циркуляционной нагрузки), соответственно; kn_i , kk_i – коэффициенты гранулометрического состава для i -той фракции, поступающей из питателя и обратной ветви. Гранулометрический состав материала вторичного потока материала, поступающего в мельницу после классификатора (циркулирующей нагрузки) определяется зависимостью

$$kk_i = \sum (Qn_i + Qk_i)kd_i / \sum (Qn_i + Qk_i). \quad (2)$$

Для построения ячеечной модели измельчения используются методы системной динамики и система моделирования AnyLogic. В таких моделях основной интерес представляют накопители некоторого содержания и анализ изменения их объемов во времени. Математической основой методов системной динамики являются дифференциальные модели, в которых используются представления динамических процессов в пространстве состояний.

В общей структуре моделей системной динамики выделяются два компонента:

1. Переменные состояния и переменные скорости изменения состояния, определяющие состояние модели, задаются в сети потоков системами разностных уравнений и в описании присутствуют в неявном виде.

2. Переменные структурированного представления функции. С их помощью осуществляется структуризация функциональных зависимостей.

Это основные образы моделируемых процессов в системной динамике.

Как сети потоков в модели рассматриваются материальные ингредиенты. Каждый компонент сети соответствует какой-то одной совокупности однородных ингредиентов, динамика которых учитывается в модели. Сеть имеет узлы и дуги.

Узлы компонентов сети потоков (за исключением нулевого узла) изображают наиболее существенные состояния выделенных ингредиентов, а дуги сети задают возможные переходы их элементов из одного состояния в другое.

С целью проверки предположения о возможности построения очаговой модели измельчения методами системной динамики разработан пилотный проект для случая трехфракционной смеси материала, подаваемого на струйную измельчительную установку замкнутого типа. Готовым продуктом измельчения принимается четвертая фракция, получаемая в результате измельчения исходной смеси материала. В данной модели принимается, что начальная смесь имеет постоянный фракционный состав и подается в мельницу с постоянной скоростью. Также принимается, что в мельнице происходит следующий процесс измельчения:

- в мельницу одновременно и синхронно поступают массы материалов трех крупных фракций;

- масса материала i -той ($i = 1 \dots 3$) фракции поступает в мельницу независимо от других фракций;

- частицы этой фракции материала подвергаются разрушению и переходят во фракцию с меньшим размером зерен и при этом не покидают зону разрушения мельницы в течение некоторого времени Δt ;

- через некоторое заданное время весь материал покидает мельницу.

В модели задается некоторая распределительная функция измельчения, показывающая вероятность перехода измельченного материала с i -той в j -ю фракцию и некоторая селективная функция измельчения, которая показывает долю i -той фракции, разрушаемую за единицу времени.

Цель моделирования: получить зависимость гранулометрического состава измельчаемого материала, от времени пребывания в струйной мельнице.

Имитационная модель кинетики переходов между фракциями материала внутри мельницы построена по следующему принципу:

1. Есть четыре накопителя $F1, F2, F3, F4$, имитирующие объем четырех фракций внутри мельницы. В начальный момент времени в накопителях $F1, F2, F3$ находится определенный объем исходного материала трех различных фракций; в накопителе $F4$ материал отсутствует.

2. Также есть три накопителя $F11, F22, F33$, имитирующие объем первых трех фракций внутри мельницы через предельно малый прирост времени – dt .

3. Между накопителями $F1 \rightarrow F11$, $F2 \rightarrow F22$, $F3 \rightarrow F33$ определены потоки соответствующих фракций материала $F1_F1$, $F2_F2$, $F3_F3$, которые определяют скорость изменения объема соответствующих фракций в мельнице и потоки соответствующих фракций материала $F1_obr$, $F2_F1_obr$, $F3_obr$, которые определяют циркуляцию соответствующих фракций внутри мельницы.

4. Между накопителями $F1$, $F2$, $F3$, $F4$ также определены потоки измельченного материала: поток $F_m \rightarrow F_n$, ($m - 1..4$, $n - 1..4$) определяет поток n – фракции материала, возникает в результате измельчения m – фракции за время dt .

Значение накопителей $F1$, $F2$, $F3$ и $F4$ в каждый момент времени исчисляется в соответствии

$$d(F1)/dt = -k11*F11 - k12*F1_F2 - k13*F1_F3 - k14*F1_F4, \quad (3)$$

$$d(F2)/dt = k12*F1 - k22*F22 - k23*F2_F3 - k24*F2_F4, \quad (4)$$

$$d(F3)/dt = k12*F1 - k22*F22 - k23*F2_F3 - k24*F2_F4, \quad (5)$$

$$d(F4)/dt = F1_F4 + F2_F4 + F3_F4 \quad (6)$$

Решение этих дифференциальных уравнений осуществляется численным методом Эйлера с начальным значением $dt = 1$ мс.

Значения коэффициентов k , определяющих изменение гранулометрического состава, в общем случае зависят от многих параметров, в том числе от времени измельчения, и могут быть определены только экспериментальным путем. В данной модели они определены только как функция от соответствующих накопителей и исчисляются долей от них.

На рис. 2 показано окно презентации модели, в котором отражена модель кинетики измельчения материала в терминах системной динамики и временной график, отражающий зависимость изменения гранулометрического состава и суммарной производительности по готовому продукту от времени.

Модельные эксперименты на обеих моделях показали следующее. Производительность по готовому классу (рис. 2 а кривая 1) зависит от загруженности мельницы (модель 1). При дискретной (порционной) оптимальной загрузке помольной камеры производительность измельчения возрастает (см. Рис. 2 а кривая 1 при $t = 40-70$ мс).

Для исследования процесса измельчения материала в помольной камере, опираясь на факт независимости кинетики измельчения фракций и пропорциональности необходимой для измельчения энергии поверхности, которая только образовалась, рассмотрена вторая модель на базе кинетики гранулометрического состава исходного материала. Время измельчения фракций заранее задавалось в модели 2.

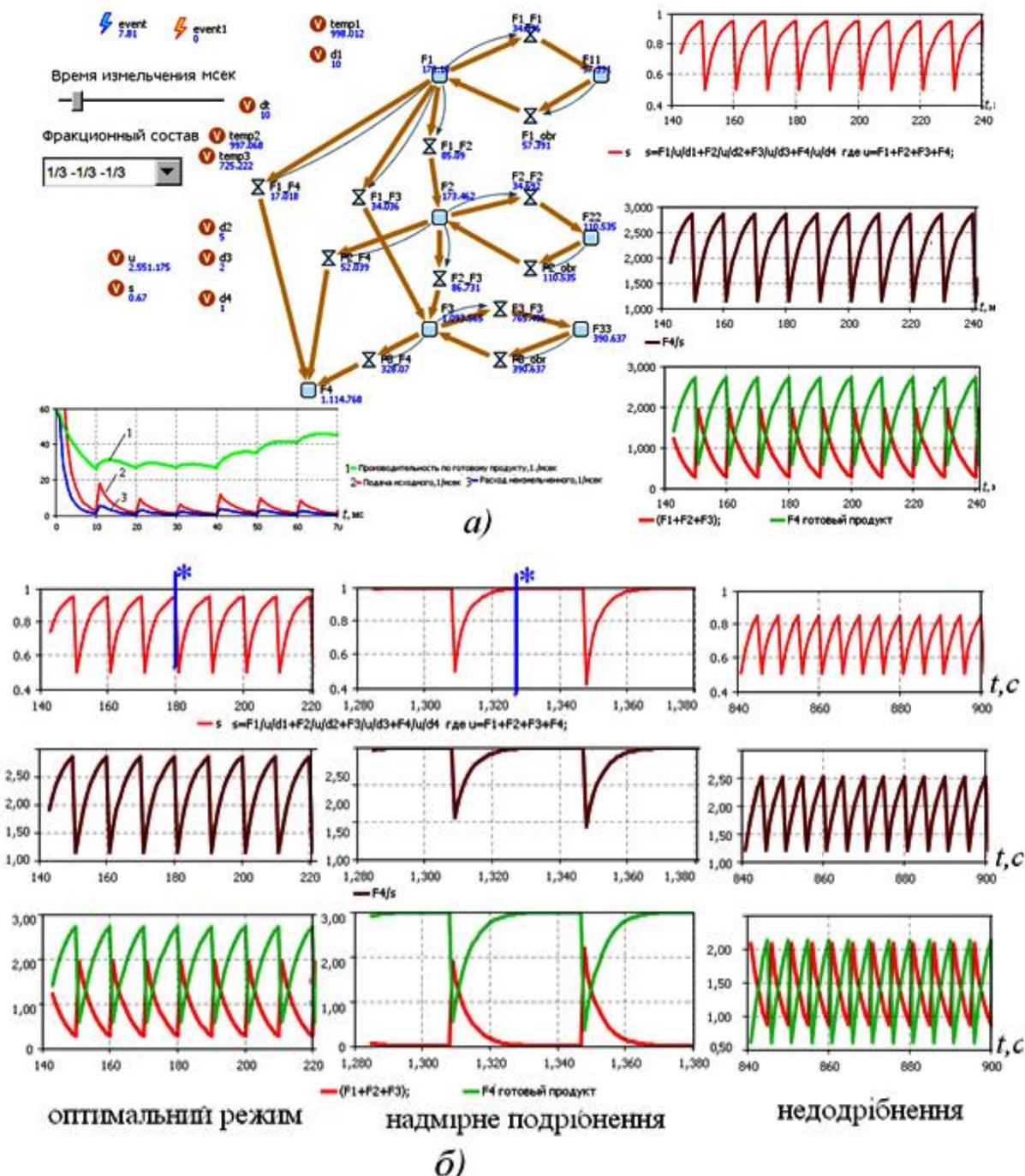


Рис. 2. Окно презентации динамической модели (а) и результаты моделирования состава материала в камере при разном времени измельчения (б)

Для соединения результатов этих моделей и разработки алгоритма контроля дисперсности необходимо выяснить, как вычислить время измельчения фракций. Это позволяет на основе имеющейся дисперсности материала в помольной камере определять момент подачи материала из бункера загрузки в мельницу для поддержания оптимальной его загрузки, то есть для поддержания оптимальной производительности мельницы. В работе предлагается этот последний параметр (время измельчения фракций) определять по результатам акустического мониторинга. Поскольку установлена зависимость характери-

стик сигналов (максимальной амплитуды, характерной частоты и ее дисперсии) от размеров частиц, то по результатам анализа сигналов рабочей зоны мельницы можно выявить наличие фракций материала в камере и определить необходимость загрузки, причем, таким образом исключается возможность чрезмерного измельчения или недоизмельчения.

На рис. 2 б, показаны результаты работы модели по определению состава материала в помольной камере мельницы за разное время измельчения. Необходимое время загрузки показано на рис. 2 б, со звездочкой синего цвета. Это время определяется при анализе сигналов мониторинга зоны измельчения, когда дисперсия характерной частоты необходимой контрольной фракции ($F4$ в модели) достигает заданного оптимального значения.

На основе имитационного моделирования разработан алгоритм контроля дисперсности измельченного продукта. Схема контроля качества продукта представлена на рис. 3.

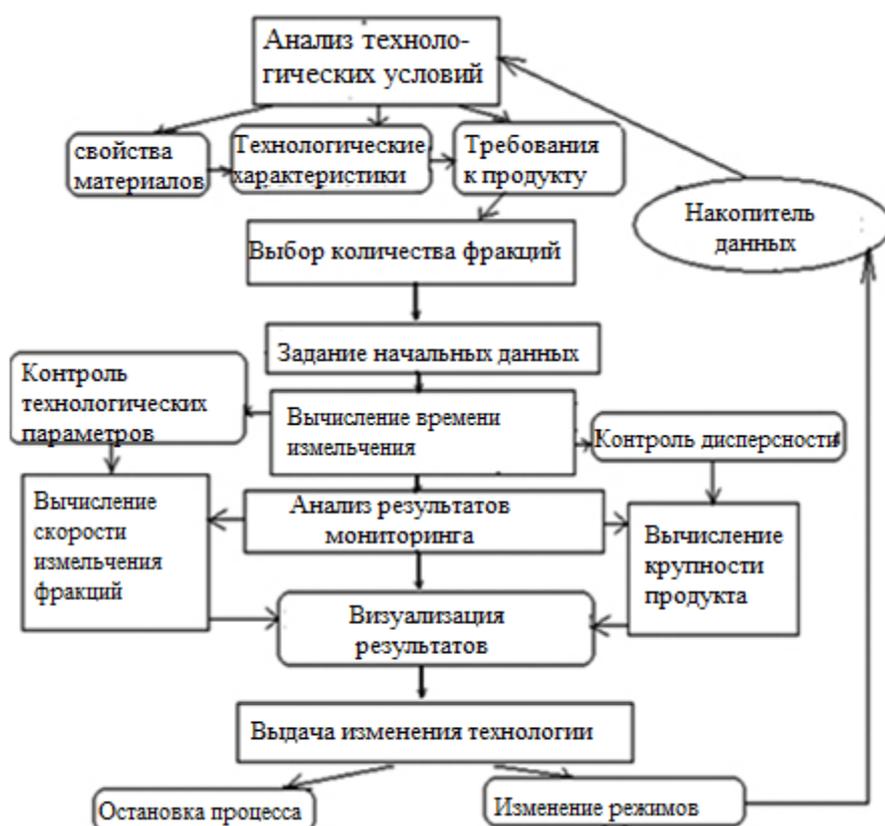


Рис. 3. Схема контроля качества измельченного продукта.

Выводы. Исследование процесса измельчения в замкнутой системе на основе комплексного моделирования всей системы измельчения и динамического моделирования кинетики измельчения фракций материала в помольной камере показало, что возможно определить необходимый выход контрольного класса при оптимальной производительности мельницы. Время измельчения для получения требуемого количества контрольного класса можно определить по результатам акустического мониторинга зоны измельчения. Это позволило разра-

ботать алгоритм контроля дисперсности измельченного продукта. Установленная зависимость характеристик сигналов (максимальной амплитуды, характерной частоты и ее дисперсии) от размеров частиц, позволяет по результатам анализа сигналов рабочей зоны мельницы выявить наличие фракций материала в камере и определить необходимость загрузки мельницы, причем, исключается возможность чрезмерного измельчения или недоизмельчения. На основе полученных результатов возможно управление процессом измельчения материала. Необходимо разработать аппаратную базу для управления загрузкой бункера на основе акустических сигналов.

Перечень ссылок

1. Pryadko, N.S. (2015). Optimization of fine grinding on the acoustic monitoring basis. *Power Engineering, Control & Information Technologies in Geotechnical Systems*, Taylor & Francis Group, London, 99-108.
2. Терновая, Е. В., Прядко, Н. С. (2017). Установление возможности оценки фракционного состава сыпучих материалов по частотным характеристикам акустических сигналов в потоке. *Збагачення корисних копалин*, (67 (108)), 161-168.
3. Строгалев, В. П., Толкачева, И. О. (2008). *Имитационное моделирование*. МГТУ им. Баумана, 280 с.
4. Хемди А. Таха (2007). *Имитационное моделирование. Введение в исследование операций*, 7-е изд.. М.:Вильямс, 912 с.
5. Карпов, Ю. Г. (2006). *Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5*. СПб : БХВ-Петербург, 400 с.
6. Трофимова, Л. А., Трофимов, В. В. (2011). *Управленческие решения (методы принятия и реализации)* : учебное пособие. СПб. : Изд-во СПбГУЭФ, 190 с.

АНОТАЦІЯ

Мета – розробка імітаційної моделі системи контролю і управління процесом подрібнення в замкнутому циклі.

Методика. Для моделювання кінетики гранулометрії продуктів струминного подрібнення на основі теоретичних і експериментальних досліджень, проведено імітаційне моделювання зміни гранулометричного складу матеріалу в ході подрібнення в середовищі моделювання AnyLogic. Розглянуто замкнутий цикл подрібнення з періодичною подачею матеріалу. Для створення динамічної імітаційної моделі замість матричної моделі побудована осередкова модель подрібнення. Розглянуто випадок трьохфракційної суміші матеріалу, що подається на струминну подрібнювальну установку замкнутого типу. Контрольний клас крупності є четвертою фракцією. При створенні моделі кінетики переходів між фракціями матеріалу всередині млина використовуються диференціальні рівняння, рішення яких здійснюється чисельним методом Ейлера. Визначено час подрібнення для виходу контрольного класу. Встановлена залежність характеристик сигналів від розмірів частинок дозволяє визначити необхідність завантаження млина.

Результати. На основі комплексного моделювання всієї системи подрібнення і динамічного моделювання кінетики подрібнення фракцій визначається необхідний вихід контрольного класу. За результатами акустичного моніторингу зони подрібнення визначається час подрібнення для отримання необхідної кількості контрольного класу. Розроблено алгоритм контролю дисперсності подрібненого продукту. Встановлена залежність характеристик сигналів від розмірів частинок, дозволяє за результатами аналізу сигналів робочої зони млина з'ясувати

наявність фракцій матеріалу в камері і визначити необхідність завантаження млина, при цьому виключається можливість надмірного подрібнення або недоподрібнення матеріалу. На базі результатів моделювання можна керувати процесом подрібнення матеріалу.

Наукова новизна. Отримані результати імітаційного моделювання адекватно описують процес подрібнення матеріалу і можуть бути використані для управління процесом подрібнення.

Практична цінність. Результати дослідження є базою для розробки автоматичної системи управління роботою струминної подрібнювальної установки.

Ключові слова: струминне подрібнення, імітаційне моделювання, акустичний сигнал, амплітуда, кінетика.

ABSTRACT

The study purpose is to develop a simulation model of the system for monitoring and control the grinding process in a closed cycle.

Methodology. To simulate the granulometry kinetics of jet grinding products based on theoretical and experimental studies, a simulation was carried out to simulate changes in the material grain size distribution during grinding in the AnyLogic modeling environment. A closed grinding cycle with a periodic feed of material is considered. To create a dynamic simulation model, instead of a matrix model, a cell model of grinding has been built. The case of a three-fractional mixture of material supplied to a closed-type jet grinding plant is considered. The control class size is the fourth fraction. For creating the kinetics model of transitions between material fractions inside the mill differential equations are used, which are solved by the Euler numerical method. The grinding time of the control class output is determined. The established dependence of the signal characteristics on the particle size allows determining the necessity of the mill feeding.

Results. Based on the integrated modeling of the entire grinding system and dynamic modeling of the fraction grinding kinetics the required control class yield is determined. According to the acoustic monitoring results of the grinding zone, the grinding time is determined to obtain the required amount of the control class. The control algorithm for the crushed product dispersion has been developed. The established dependence of the signal characteristics on the particle size makes it possible to determine the presence of fractions of the material in the chamber and determine the need to load the mill, according to the results of the analysis of the signals from the working area of the mill, while eliminating the possibility of over-grinding or under-grinding the material. On the basis of the simulation results, it is possible to control the process of material grinding.

Scientific novelty. The obtained simulation results adequately describe the process of material grinding and can be used for control the grinding process.

Practical significance. The research results are the basis for the development of an automatic control system for the jet-grinding plant operation.

Keywords: jet grinding, simulation, acoustic signal, amplitude, kinetics.