УДК 622.73

Н. С. ПРЯДКО

ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМКНУТЫХ ЦИКЛОВ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Учитывая высокую энергоемкость тонкого измельчения, необходимо разработать условия достижения оптимального уровня производительности мельниц тонкого помола при соблюдении необходимого выхода продукта контрольного класса и снижении энергоемкости процесса. На базе анализа проведенных исследований и существующей технологии замкнутых циклов тонкого измельчения установлены закономерности изменения зависимости, связывающей вновь образованную поверхность тонкоизмельченного продукта с энергозатратами на этот процесс. Сформулирована основная задача тонкого измельчения – определение условия и времени перехода процесса измельчения через критический уровень.

Приведены результаты динамического моделирования замкнутого цикла тонкого измельчения полезных ископаемых. На основе модельных исследований кинетики измельчения, учитывающей переходы между фракциями материала в мельнице, определен поверхностный параметр, связывающий производительность по контрольному классу с удельной поверхностью продукта измельчения. Это позволило повысить производительность мельницы при требуемой дисперсности продукта.

З огляду на високу енергоємність тонкого подрібнення, необхідно розробити умови досягнення оптимального рівня продуктивності млинів тонкого млива при дотриманні необхідного виходу продукту контрольного класу й зниженні енергоємності процесу. На базі аналізу проведених досліджень і існуючої технології замкнутих циклів тонкого подрібнення встановлено закономірності зміни залежності, що зв'язує знову утворену поверхню продукту з енерговитратами на цей процес. Сформульовано основне завдання тонкого подрібнення – визначення умови й часу переходу процесу через критичний рівень. Показано залежність продуктивності млина від виходу тонкої фракції готового продукту.

Наведено результати динамічного моделювання замкненого циклу тонкого подрібнення корисних копалин. На основі модельних досліджень кінетики подрібнення, що ураховує переходи між фракціями матеріалу в млині, визначено поверхневий параметр, що зв'язує продуктивність по контрольному класу з питомою поверхнею продукту подрібнення. Це дозволило підвищити продуктивність млина при необхідній дисперсності продукту.

Taking into account high power consumption of fine grinding, it is necessary to develop optimal conditions of production of the pulverizing mill with the required output of the control class and reduced power consumption. Based on the research conducted and current technology of closed cycles for fine grinding, the regularities of variations in the dependency relating a newly formed surface of a pulverized product with power inputs for this process are established. The main goal of fine grinding is formulated: determination of conditions and time when grinding achieves a critical level.

The dynamic results for modelling mineral closed-cycle fine grinding are presented. Based on simulation of grinding kinetics considering transitions between material fractions in a mill, the superficial parameter relating the capacity on a control class with a specific surface of grinding product is determined. It allowed improvement of the mill capacity at the required product dispersion

Введение. В настоящее время для правильного подбора оборудования горно-обогатительных комбинатов и эффективного его использования широко используются различные пакеты компьютерных программ для расчета схем обогащения, в т. ч. рудоподготовки. Рудоподготовка включает операции дробления, грохочения, измельчения, смешивания потоков, загрузки исходного материала и складирования готового продукта. С помощью моделирования можно рассмотреть множество возможных схем рудоподготовки, спрогнозировать показатели схем при изменении параметров работы оборудования с целью достижения нужной крупности продукта.

Моделирование схем рудоподготовки в основном базируется на двух методах: имитационном (стационарном) и динамическом моделировании. Имитационное моделирование основывается на логико-математическом описании объекта, позволяет анализировать и оценивать его работу, строить модели, которые достаточно точно описывают реальную схему.

Наиболее известные пакеты по моделированию схем дробления и измельчения рассмотрены в [1]. Одни из них – PlantDesigner и BRUNO, разра-

ботанные соответственно Sandvik и Metso Minerals, обладают встроенными базами данных по оборудованию, сырью и не требуют дополнительных параметров и характеристик. Однако эти пакеты не предусматривают расчет схем измельчения и адаптированы к оборудованию своих фирм. Другие программные продукты – JKSimMet и USIM PAC – составлены из универсальных модулей, основанных на известных принципах работы основного рудоподготовительного оборудования и требующих огромного объема исходных данных. Для точного моделирования конкретной схемы требуется ввод всех необходимых сведений, и корректность модели прямо зависит от точности данных.

На основе динамического моделирования описывается изменение состояния объекта, и разработанные пакеты используются для создания систем автоматического управления. 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]. Математическая модель динамической системы считается заданной, если введены параметры (координаты) системы, определяющие однозначно ее состояние, и указан закон эволюции состояния во времени. В зависимости от степени приближения одной и той же системе могут быть поставлены в соответствие различные математические модели. Исследование реальных систем идет по пути изучения соответствующих математических моделей, совершенствование и развитие которых определяется анализом экспериментальных и теоретических результатов при их сопоставлении.

Постановка задачи. В обогатительной практике было найдено технологическое решение регулирования производительности измельчения путем создания замкнутых циклов измельчения, в которых измельченный продукт подается в классифицирующий аппарат, где тонкий продукт (готовый) выводится из измельчительного цикла, а более грубый продукт (пески), образующий циркулирующую нагрузку, направляется снова в тот же измельчительный аппарат (рис. 1).

Рис. 1 – Замкнутый цикл тонкого измельчения

Использование замкнутых циклов позволяет сократить переизмельчение материала и добиться выхода продуктов нужной дисперсности. Однако процесс измельчения остается достаточно энергоемким, а измельчительные аппараты работают не всегда с максимальной производительностью, значит, наблюдается завышенное энергопотребление. Поэтому актуальной является

разработка системы управления замкнутым циклом тонкого измельчения с целью повышения производительности и снижения энергоемкости процесса измельчения при достижении необходимого выхода контрольного класса крупности продукта измельчения.

Целью данной работы является разработка модели замкнутого цикла тонкого измельчения, позволяющей определить критерии оптимизации процесса измельчения.

Многочисленные исследования закономерностей измельчения [3, 4] позволили выделить главную характеристику, которая связывает вновь образованную удельную поверхность $S_{уд}$ при измельчении с удельными энергозатратами $Э_{уд}$ на этот процесс (см. рис. 2).

В этой характеристике можно выделить 3 участка. Первый участок линейно связывает вновь образованную удельную поверхность с удельными энергозатратами. Это соответствует помолу достаточно крупных частиц.

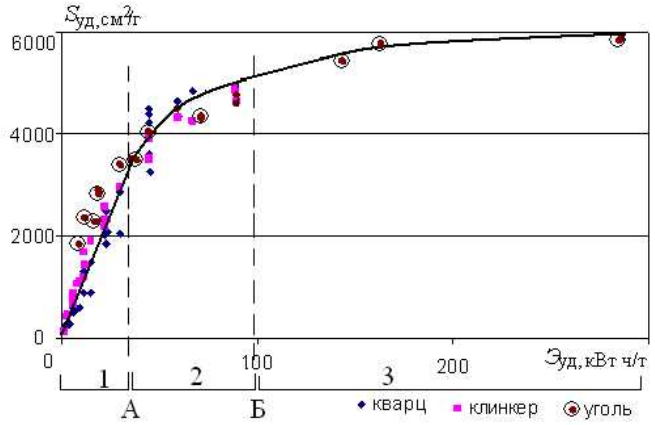

Рис. 2 –Зависимость удельной поверхности от удельных энергозатрат.
0 – А – область линейной связи; А–Б – область накопления тонких частиц; Б – критический порог.

По мере того как появляются тонкие частицы, энергии на разрушение таких частиц приходится затрачивать больше, и поэтому чувствительность упомянутой характеристики к увеличению энергозатрат мельницы снижается (участок 2 на рис. 2).

Третий участок соответствует условиям, когда тонких частиц очень много, размеры их приближаются к микронным. Поэтому на этом участке необходимо разрушать сверхтонкие частицы, близкие по размерам к молекулам. Естественно, что для такого разрушения необходимо потратить огромную энергию, поэтому характеристика $S_{уд}(Э_{уд})$ становится крайне малочувствительной к увеличению энергозатрат. Таким образом, граница между участками 2 и 3 (критический уровень) для функции $S_{уд}(Э_{уд})$ является границей возможностей механического раскрытия ценных компонентов и, вообще, применения механического обогащения. Поэтому не имеет смысла переходить за правую границу участка 2, а если такой переход осуществляется, то нужно изменить процесс измельчения в сторону снижения энергозатрат. Отсюда возникает основная задача тонкого измельчения – определить условия

перехода процесса измельчения через критический порог (граница Б), а в случае такого перехода, вернуть процесс в область тонких частиц (А – Б), если не решается задача получения сверхтонких продуктов.

Превышение критического уровня говорит о том, что накопилось значительное количество частиц, достаточно мелких, но требующих дальнейшего снижения их размера, т. е. необходимо снизить производительность измельчительного аппарата. Уменьшение критического уровня говорит о том, что измельчительный процесс имеет некоторый резерв и измельчительный агрегат может увеличить свою производительность.

Чем труднее измельчается материал, тем больше получается циркулирующая нагрузка. Тем не менее, может возникнуть такой режим, когда количество песков неограниченно увеличивается и в результате измельчительный аппарат также неограниченно принимает нагрузку и может достичь такого режима, когда он не в состоянии переработать поступающий на него материал. Это может привести к аварийной ситуации и, чтобы ее избежать, необходимо отключить поток свежего материала до тех пор, пока количество циркулирующей нагрузки не снизится до допустимого уровня. Таким образом, циркулирующая нагрузка является управляющим воздействием, которое может существенно изменять производительность замкнутого цикла измельчения. После того как этот уровень будет достигнут, можно снова увеличить подачу свежего материала в цикл измельчения.

Проведенные рассуждения позволяют сделать вывод о том, что необходим выбор величины резкого изменения производительности цикла измельчения по исходному материалу, когда происходит переход через критический уровень. В этом состоит вторая задача поиска оптимальной работы измельчительной установки. Наконец, необходимо определить по состоянию цикла измельчения момент перехода режимом измельчения критического уровня. Это является третьей задачей исследований.

Решение перечисленных трех задач позволит решить проблему создания оптимальных условий сверхтонкого помола, который, как известно, является весьма энергоемким в связи с тем, что, как отмечалось ранее, частицы приближаются к микронным размерам.

Многочисленные исследования по определению зависимости выхода готового класса в процессе измельчения от энергозатрат мельницы [6], проведенные на железорудных комбинатах, показали, что эта зависимость существенно нелинейная и в ней можно выделить два участка (см. рис. 3): первый участок (0 – Б) имеет высокую чувствительность к изменению энергопотребления замкнутого процесса, и на втором участке правее линии Б эта зависимость имеет весьма малую чувствительность. На рис. 3 показаны результаты работы различных горно-обогатительных комбинатов Криворожского железорудного бассейна [4]: 1 – Южный, 2 – Ново-Криворожский, 3 – Центральный, 4 – Северный, 5 – Ингулецкий.

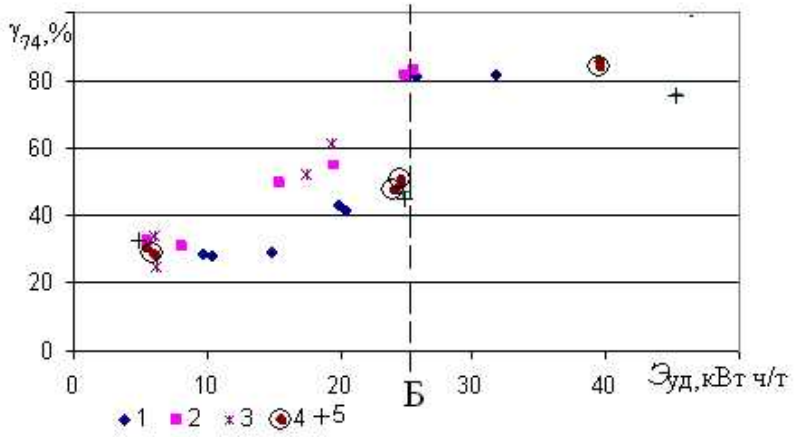

Рис. 3 – Зависимость содержания готового класса γ_{74} в продукте измельчения от удельных энергозатрат для разных рудоразмольных мельниц железорудных обогатительных фабрик.

Еще одно подтверждение тому, что получение тонко измельченного продукта требует больших энергозатрат и при этом производительность Q при неизменном расходе свежего сырья уменьшается и в пределе стремится к нулю, приведено на рис. 4. Все это указывает на необходимость управления процессом тонкого измельчения для получения высокой производительности по тонкому продукту. Для этого разработана динамическая модель тонкого измельчения в замкнутом цикле.

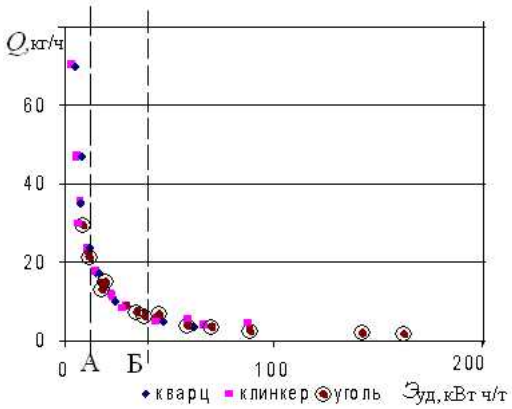

Рис. 4 – Зависимость производительности мельницы от ее удельных энергозатрат при тонком измельчении материалов.

На первом этапе в работе [5] предложена модель замкнутого цикла измельчения, основанная на дискретно-событийном подходе и моделировании стохастических динамических процессов. Начальными данными были фракционные потоки исходного материала, заданный объем загрузки мельницы, необходимая крупность измельченного продукта (контрольный класс) и заданное фиксированное время измельчения материала.

Одной из основных задач второго этапа моделирования является моделирование кинетики переходов между фракциями материала внутри мельницы. В ходе моделирования определяется необходимое время измельчения до

заданной крупности и уточняются критерии управления производительностью измельчительной установки.

Разработанное программное обеспечение выполнено при помощи среды программирования AnyLogic (Санкт-Петербург) [5] с использованием языка программирования JAVA и специализированной объектно-ориентированной библиотеки объектов системной динамики.

В ходе работы программного комплекса проводится анализ изменения объемов фракций во времени. Используется 5-ти фракционная модель материала при измельчении (см. рис. 5).

Исходный материал, загружаемый в мельницу, содержит три фракции (F1, F2, F3). В процессе измельчения материала в мельнице образуются две фракции (F4, F5). При этом фракция F4 является контрольным классом продукта измельчения. Фракция F5 – объем нежелательного переизмельчения продукта.

Следующие параметры являются переменными модели: интервал времени дискретной подачи исходного продукта в мельницу Δt (мс), объем и фракционный состав исходного материала.

Объем фракций в каждый момент времени вычисляется из системы дифференциальных уравнений:

$$d(Fi)/dt = -\sum_{J=1}^{5}(k_{i,j} \cdot Fi\_Fj), \qquad (1)$$

где Fi_Fj – поток материала фракции j, возникающий в результате измельчения фракции i за время dt, т. е. объем фракции i, перешедший во фракцию j; $k_{i,j}$ – коэффициенты, определяющие долю фракций в материале, т. е. матрица $\|k_{i,j}\|$ является матрицей измельчения данного материала.

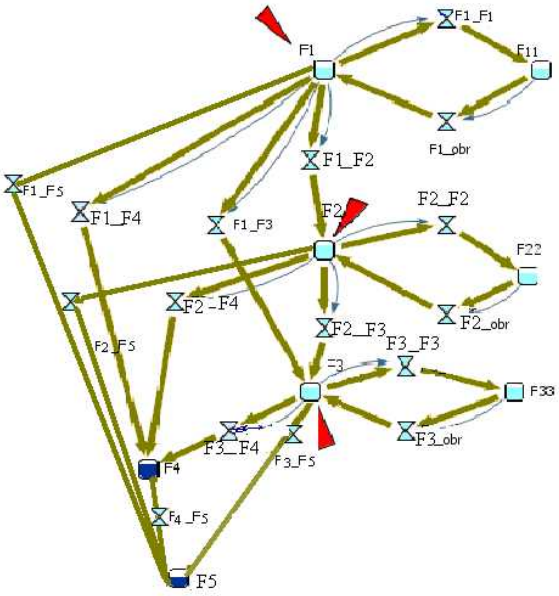

Рис. 5 – Схема фракционных потоков в мельнице

Циркулирующая нагрузка каждой фракции на рис. 5 включает объемы: *Fii* – объем фракции, оставшейся во фракции *i*; *F1_obr*, *F2_ F1_obr*, *F3 _obr* – циркулирующие потоки соответствующих фракций материала внутри мельницы.

Решение этих дифференциальных уравнений осуществляется численным методом Эйлера с начальным значением Δt =1 мсек.

Как известно, один и тот же выход контрольного класса крупности можно получить при различной величине вновь образованной поверхности этого продукта [4]. Увеличение этого показателя дисперсности при соблюдении требования заданного выхода контрольного класса крупности обозначает переизмельчение продукта измельчения. Это ведет к повышенному энергопотреблению мельницы в ходе измельчения.

Для решения этой проблемы в динамической модели был введен поверхностный показатель *S(F4)*, позволяющий контролировать величину образованной поверхности частиц измельченного продукта.

Удельная поверхность материала определяется в виде

$$S_{\text{уд}} = k_s \sum_{i=1}^{5} \frac{\beta_i}{\bar{d}_i},$$

где β_i – выход класса крупности со средним размером частиц $\bar{d}_i$, k_s – показатель, связанный со свойствами материала.

Затем вычисляется время измельчения данного исходного материала до заданного контрольного класса и допустимой вновь образованной поверхности продукта измельчения. Оптимальное время измельчения в камере, определенное во второй модели, подставляется в первую модель. Это позволяет связать две созданные модели в единый комплекс. Таким образом, определяется оптимальный режим работы всего замкнутого цикла.

На рис. 6 показано изменение производительности G в ходе регулирования модели замкнутого цикла тонкого измельчения.

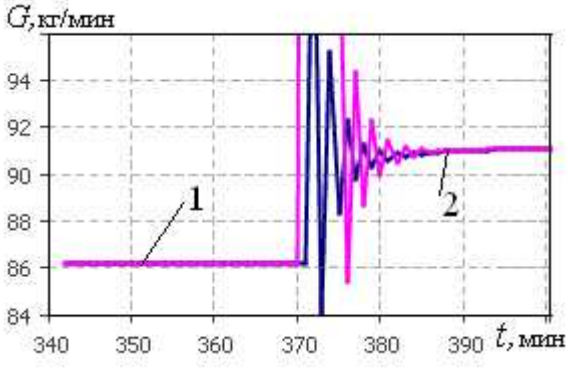

Рис. 6 – Повышение производительности мельницы (2) при использовании оптимального времени измельчения и поверхностного показателя *S(F4)*

Выводы. Исследования показали перспективность динамического моделирования тонкого измельчения в замкнутых циклах. На основе моделирования кинетики измельчения определено время измельчения для получения заданного выхода контрольного класса. Выделенный поверхностный показа-

тель, связывающий вновь образованную поверхность с выходом контрольного класса, позволил разработать систему управления производительностью мельницы.

1. *Таранов В. А.* Обзор программ по моделированию и расчету технологических схем рудоподготовки/ *В. А. Таранов, В. Ф. Баранов, Т. Н. Александрова* // Обогащение руд. – 2013. – № 5. – С. 3 – 7.
2. *Анищенко В. С.* Знакомство с нелинейной динамикой : Лекции соросовского профессора : Учеб. пособие / *В. С. Анищенко.* Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002. – 144 с.
3. *Андреев С. Е.* Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава / *С. Е. Андреев, С. В. Товаров, В. А. Перов* // М. : ГНТИ лит-ра по черн.и цв. метал. – 1959. – 437 с.
4. *Пилов П. И.* Снижение энергопотребления в замкнутых циклах тонкого измельчения руд / *П. И. Пилов, Н. С. Прядко* // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 6. – С. 75 – 80.
5 *Прядко Н. С.* Имитационная модель замкнутого цикла измельчения минерального сырья / *Н. С. Прядко, Г. М. Саксонов, Е. В. Терновая* // Системные технологии. – 2014. – № 3 (86). – С. 19 – 25.
6. *Пилов П. И.* Описание удельной поверхности продуктов измельчения на основе функции распределения дисперсности / *П. И. Пилов, Н. С. Прядко* // Збагачення корисних копалин. – 2013. – № 53(94). – С. 57 – 64.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 24.04.14,
в окончательном варианте 24.06.14