УДК 622.73

Н. С. ПРЯДКО, Г. А. СТРЕЛЬНИКОВ, Л. В. МУЗЫКА

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ГАЗОСТРУЙНОЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: np-2006@ukr.net

Зростаючий попит у багатьох галузях промисловості на тонкодисперсні матеріали, з одного боку, та висока енергоємність технологічного процесу подрібнення, з іншого боку, роблять актуальним задачу підвищення продуктивності млинів тонкого подрібнення. Мета роботи полягає в розробці системи контролю і регулювання продуктивності струминної подрібнювальної установки за результатами акустичного моніторингу її робочих зон. Новий підхід полягає в постійному контролі гранулометричного складу матеріалу і формуванні керуючих впливів щодо циркулюючого навантаження подрібнювальної установки на основі аналізу характеристик акустичних сигналів в помольній камері.

Досліджено основні фактори, що впливають на ефективність струминного подрібнення матеріалів. Побудована тривівнева модель враховує особливості замкнутого циклу подрібнення, кінетику гранулометричного складу матеріалу в камері подрібнення і зв'язок процесу з характеристиками акустичних сигналів. Показано, що для отримання високої продуктивності млина по готовому продукту заданої крупності необхідно контролювати акустичні сигнали зони подрібнення і регулювати по ним заповнення помольної камери, підтримуючи його на оптимальному рівні. Додаткова установка системи контролю в зоні транспортування готового продукту за класифікатором за типом «гранулометра» дозволить вносити додаткову поправку , що робить моніторинг якості практично неперервним. За характеристиками записаних акустичних сигналів система автоматично визначає наявність в двофазному потоці часток крупніших за контрольний клас, і вказує на необхідність зміни режиму класифікації. Виключення вірогідності повторного подрібнення підвищує якість продукції та знижую енерговитрати процесу. Ці дослідження будуть базою для уточнення моделі та розробки автоматизованої системи управління струминної подрібнювальної установки.

Возрастающий спрос во многих отраслях промышленности на тонкодисперсные материалы, с одной стороны, и высокая энергоемкость технологического процесса измельчения, с другой стороны, делают актуальной задачу повышения производительности и снижения энергопотребления мельницами тонкого измельчения. Цель работы заключается в разработке системы контроля и регулирования производительности струйной измельчительной установки по результатам акустического мониторинга ее рабочих зон. Новый подход состоит в постоянном контроле гранулометрического состава материала и формировании управляющих воздействий по циркулирующей нагрузке измельчительной установки на основе анализа характеристик акустических сигналов в камере измельчения.

Исследованы основные факторы, влияющие на эффективность струйного измельчения материалов в замкнутом цикле. Построенная трехуровневая модель процесса измельчения учитывает особенности замкнутого цикла измельчения, кинетику гранулометрического состава материала в камере измельчения и связь процесса с характеристиками акустических сигналов. Показано, что для получения высокой производительности по готовому продукту заданной крупности необходимо контролировать акустические сигналы зоны измельчения и регулировать по ним загрузку помольной камеры, поддерживая ее на оптимальном уровне. Эти исследования могут служить базой для разработки автоматизированной системы управления струйной измельчительной установки. Дополнительная установка системы контроля в зоне транспортирования готового материала за классификатором по типу модели «гранулометра» позволит вносить дополнительную поправку, делающую мониторинг качества практически непрерывным. По характеристикам записанных акустических сигналов система автоматически определяет наличие в двухфазном потоке частиц крупнее контрольного класса и указывает на необходимость корректировки режима классификации. Исключение вероятности повторного измельчения повышает качество продукции и снижает энергопотребление процесса. Эти исследования будут служить базой для уточнения модели и дальнейшей разработки автоматизированной системы управления струйной измельчительной установки.

Increasing demand for fine materials in many industries from one hand, and high power consumption level of grinding process from another hand, makes the task of increasing of fine grinding mill productivity actual one. The aim of the work is to develop a system for monitoring and controlling the jet grinding plant productivity based on the results of acoustic monitoring of its working areas. The new approach consists in the constant control of the material granulometric composition and the formation of control actions over the circulating load of the grinding plant on the basis of the acoustic signal characteristic analysis.

The main factors influencing on the material jet grinding efficiency are investigated. The constructed three-level model takes into account the features of the closed grinding cycle, the kinetics of the material granulometric composition in the grinding chamber, and the connection of the process with the acoustic signals characteristics. It is shown that for obtaining high productivity for ready ground product of a given size, it is necessary to control the acoustic signals of the grinding zone and to regulate the grinding chamber feeding according to them, while maintaining it at the optimum level. These studies can be a basis for the development of an automated control system for a jet grinding plant. The additional installation of a control system in the transportation area of the ready product behind the classifier as the "granulometer" type model allow introducing an additional correction that makes the quality monitoring practically continuous. According to the characteristics of the recorded acoustic signals, the system automatically determines the presence in the two-phase flow of particles larger than the control class and indicates the need for adjusting the classification mode. The elimination of the probability of re-grinding improves product quality and reduces the energy consumption of the process. These researches are basis for improving model and development of jet grinding automatic control system.

Ключевые слова: *струйное измельчение, контроль, модель, акустические сигналы, амплитуда, частота, качество, готовый продукт.*

Введение. Измельчение твердых материалов на сегодняшний день является одной из актуальных проблем современной промышленности. В большинстве случаев использование твердых материалов в гетерогенных и твердофазных реакциях без их предварительного измельчения вообще невозможно. А если учесть, что многие применяемые промышленностью материалы находятся в твердом состоянии, то измельчение является основной операцией по их переработке.

Основными критериями качества измельченного продукта являются его чистота, дисперсность и поверхностная активность. В совокупности данные свойства материала влияют на многие технологические процессы, такие как вскрытие руд, обогащение полезных ископаемых, выщелачивание отдельных компонентов из минерального сырья, производство вяжущих веществ, удобрений и т. д. [1].

Одним из ведущих факторов, влияющих на свойства измельченных материалов, является способ разрушения, определяемый типом мельниц. Известно, что лучшие показатели достигаются в струйных мельницах, где разрушение происходит в струях за счет свободного удара частиц материала друг о друга или о преграду. Однако к недостаткам этого вида измельчения относят высокое энергопотребление струйных измельчительных установок. Возрастающие потребности промышленности в тонкодисперсных материалах определяют необходимость поиска способов повышения эффективности измельчения, а следовательно, и снижения энергоемкости процесса.

Состояние вопроса. Существует несколько направлений повышения эффективности тонкого измельчения в струях.

Для разрушения частиц за один или два удара необходимы большие скорости движения дисперсного потока. Причем оптимальная разрушающая скорость для частиц диаметром 0,001 мм на порядок больше, чем для частиц диаметром 1мм [2]. Такая разница в скоростях отрицательно сказывается на производительности мельницы, снижает коэффициент ее полезного действия. Поэтому созданы измельчительные установки замкнутого цикла, включающие внешние или внутренние классификаторы [3]. Так, для грубого измельчения на первой стадии применяют замкнутый цикл с контрольной классификацией продукта после мельницы и возвратом в нее недоизмельченного материала в виде циркулирующей нагрузки. Для тонкого измельчения материала (вторая и последующие стадии) применяют замкнутые циклы с предварительной (до измельчения) и контрольной (после измельчения) классификацией [4]. Эти дополнительные устройства в схеме измельчительной установки позволяют уменьшить переизмельчение материала ввиду отбора из исходного материала, а затем и из циркулирующей нагрузки мельницы, частиц крупностью менее контролируемой. Тем самым, снижается энергоемкость процесса измельчения в целом.

Следующий шаг в направлении повышения производительности измельчительной установки состоит в поддержании процесса измельчения на оптимальном уровне. Это более сложная задача, и ее пытались решать многие исследователи путем регулирования технологических параметров процесса и управления режимами. Вопросы выбора оптимального режима измельчения и управления процессом рассматривались давно [4 – 8]. Вопросам повышения эффективности работы измельчительных агрегатов посвящены труды многих советских и зарубежных авторов: С. Е. Андреева, Б. А. Арефьева, И. Г. Гривмава, Д. К. Крюкова, А. Н. Марюты, В. А. Олевского, В. А. Петрова, О. Н. Тихонова, А. Е. Тропа, Г. А. Хаца, С. Ф. Шинкоренко, Б. П. Яшина, Д. Ватсона, А. Линча и многих других. В частности, в [9] описано управление процессом струйного измельчения на базе анализа расходно-напорных характеристик пневмотранспортной сети, давления в камере измельчения. Однако в этих случаях время запаздывания было слишком большим и максимум загрузки не удавалось удерживать.

В Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины предложен новый подход к анализу процесса измельчения в струйной мельнице, более полно учитывающий особенности динамики процесса измельчения. Разработаны основы акустического мониторинга процесса, создана аппаратная база и методика записи, обработки и анализа характеристик акустических сигналов, записываемых в зоне измельчения и классификации [2]. На основе исследований установлены связи технологических параметров и характеристик сигналов акустического мониторинга, создана методика оптимизации процесса измельчения по акустическим критериям и показателям работы струйной мельницы и контроля дисперсности продуктов измельчения [10]. Все это послужило базой для разработки системы управления технологическим процессом измельчения на основе результатов его акустического мониторинга.

Целью работы является разработка модели системы контроля и регулирования производительности струйной измельчительной установки на основании результатов акустического мониторинга ее рабочих зон.

Материалы исследования. Для адекватного контроля производительности мельницы разрабатывается комплексная модель измельчительной установки, работающей в замкнутом цикле. Это значит, что модель описывает все кинетические особенности измельчения материала от загрузки в бункер до выгрузки готового продукта. Поэтому в работе представлены три уровня моделирования (см. рис. 1) и процесс измельчения рассматривается с позиции изменения гранулометрического состава материала.

Рис. 1 – Уровни моделирования процесса струйного измельчения

На первом уровне исследуется изменение крупности материала во всем цикле измельчения, включая блок подачи материала, мельницу, классификатор и блок разгрузки готового продукта. Модель второго уровня включает кинетические преобразования классов крупности материала в камере измельчения при столкновении частиц, подаваемых в струях энергоносителя. Наконец, на третьем уровне рассматриваются процессы, происходящие внутри частицы при ее разрушении. Такой комплексный подход к описанию изменения крупности материала при измельчении позволяет определить важные контрольные точки в процессе для правильного его регулирования и управления.

Схема замкнутого цикла струйного измельчения представлена на рис. 2.

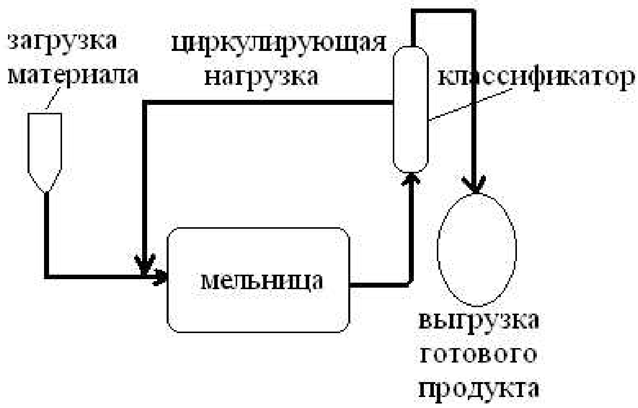

Рис. 2 – Схема замкнутого цикла струйного измельчения

Поток исходного материала из бункера загрузки подается в измельчительную установку под некоторым давлением в струях энергоносителя. Для тонкого помола продукт подают первоначально в помольную камеру, из которой под избыточным давлением частично измельченный продукт подается в классификатор, далее готовый продукт поступает в бункер для выгрузки, а материал крупнее требуемого поступает циркулирующей нагрузкой в мельницу на доизмельчение, смешиваясь с исходным материалом.

Рассматриваемый процесс измельчения в замкнутом цикле с периодической загрузкой подвержен воздействию внешних возмущений (поступление новых порций материала, изменение качества (крупности) исходного материала) и обладает внутренней стохастической составляющей (процесс разрушения частиц при столкновении). Однако внешние возмущения приложены на входе и их роль, как и внутренней стохастической составляющей процесса, относительно незначительна [7] при установившемся рабочем режиме. Главную роль в изменении переменных состояний играет широкое использование рециклов в данных процессах, вследствие чего в замкнутых циклах возникают относительно длительные и достаточно гладкие переходные процессы.

Статическая характеристика мельницы в замкнутом цикле измельчения имеет экстремальный характер и может быть описана в общем виде параболой [2]:

$$Q_Г = a_0 + a_1 Q_M - a_2 Q_M^2, \quad (1)$$

где $Q_Г$, кг/ч – производительность мельницы по готовой продукции, Q_M, кг/ч – производительность по исходному материалу, a_i – постоянные.

На рис. 3 показан график этой зависимости.

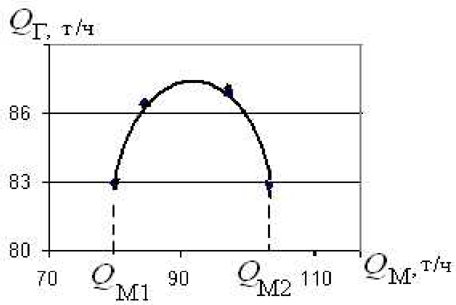

Рис. 3 – Изменение максимальной производительности мельницы по исходному материалу в замкнутом цикле измельчения.

Рабочая точка в условиях реального промышленного измельчения обычно располагается на восходящей ветви характеристики (Q_{M1}) с тем, чтобы был запас по производительности и возможность естественного регулирования: для увеличения $Q_Г$ увеличивают Q_M и наоборот. Если же мельницу несколько перегрузить, то рабочая точка переместится в точку Q_{M2} на ниспадающей ветви статической характеристики. Производительность по готовому продукту $Q_Г$ будет неизменной, а количество материала в мельнице будет больше. Тогда может возникнуть ситуация, когда с увеличением Q_M производительность по готовому продукту $Q_Г$ будет уменьшаться, что недопустимо с позиций управления.

Если же в момент, когда $Q_M = Q_{M2}$, снять нагрузку на мельницу, т. е. прекратить подачу материала, то циркулирующая нагрузка уменьшиться, замкнутый цикл измельчения начнет разгружаться и рабочая точка по статической характеристике будет двигаться через экстремум, т. е. выход готового продукта будет увеличиваться.

Следовательно, в динамическом режиме возможно увеличение $Q_Г$ за счет того, что рабочая точка будет блуждать между Q_{M1} и Q_{M2} при увеличении и снижении нагрузки. Таким образом, если в нужные моменты работы замкнутого цикла измельчения подавать нагрузку, которая вызовет смещение рабочей точки в экстремум, а затем снимать нагрузку для смещения рабочей точки в т. Q_{M1}, то можно добиться увеличения производительности по готовому продукту. На этом основана идея управления процессом измельчения в замкнутом цикле для повышения его производительности.

Однако при этом надо учитывать особенности функционирования замкнутого цикла. Чем труднее измельчается материал, тем больше материала поступает из классификатора в циркулирующую нагрузку на доизмельчение. Поэтому возможна ситуация, когда количество циркулирующей нагрузки неограниченно увеличивается, и в результате измельчительный аппарат также неограниченно принимает нагрузку и достигает такого режима, когда он не в состоянии переработать поступающий на него материал. Это может привести к аварийному режиму, остановке процесса измельчения, и чтобы его избежать, необходимо отключить поток свежего материала до тех пор, пока количество циркулирующей нагрузки станет ниже критического уровня или не снизится до допустимого уровня. После того как этот уровень будет достигнут, можно снова увеличить подачу свежего материала в цикл измельчения. Таким образом, циркулирующая нагрузка является управляющим воздействием, которое может существенно изменять производительность замкнутого цикла измельчения.

Проведенные рассуждения позволяют сделать вывод о том, что необходим выбор скачка изменения производительности цикла измельчения по исходному материалу, когда происходит переход его через критический уровень. Наконец, необходимо определить по состоянию процесса момент перехода режимом измельчения критического уровня. Решение перечисленных задач путем управления процессом позволит решить проблему создания оптимальных условий тонкого помола для получения высокой производительности по тонкодисперсному продукту.

Исследования [2, 10] процессов газоструйного измельчения показали возможность создания системы управления с использованием результатов акустического мониторинга процесса измельчения.

Для этого рассмотрим модель второго уровня, т. е. процессов в самой камере измельчения.

Для создания модели преобразования классов крупности материала в камере измельчения в ходе столкновения частиц, подаваемых в противоточных струях энергоносителя, используются сигналы, записываемые датчиком при непрерывном акустическом мониторинге. Режим процесса измельчения и состояние измельчаемого материала определяются характеристиками акустических сигналов рабочих зон мельницы [2]. Поэтому математическая модель основана на анализе амплитуды акустических сигналов (АС), записанных в каждый дискретный момент времени процесса измельчения. Таким образом, на втором этапе моделирования процесс измельчения в камере рассматривается как динамическая система, для которой состояние однозначно определяется совокупностью АС в данный момент времени и заданными закономерностями, которые описывают изменение (эволюцию) начального состояния с течением времени. Процесс моделируется на основе цепей Маркова с применением ячеечной модели.

Для создания ячеечной модели весь диапазон акустических сигналов разбивается на поддиапазоны сигналов со средними размерами амплитуды, A_i, $i = 1,2...m$, где $i = 1$ соответствует $A_{\max}$. Таким образом, все акустические сигналы, записываемые в ходе мониторинга, разбиваются на m ячеек по размерам их амплитуд. Число сигналов с соответствующими амплитудами определяет состояние элементарной ячейки. Количество АС может быть представлено вектором столбцом $N = (n_i), i = 1,...m$, где n_i – число АС i ячейки, т. е. число сигналов, имеющих амплитуду A_i. Каждое состояние характеризуется определенной вероятностью, которая может рассматриваться как доля сигналов соответствующей амплитуды A_i.

Процесс измельчения рассматривается как последовательность малых промежутков времени Δt – времени перехода. В этом случае текущие моменты времени процесса и записи акустического мониторинга будут определяться как $t_k = k\Delta t$, где целое число $k = 1,2...$ – номер перехода. Его можно рассматривать как дискретный текущий момент времени. За k-й переход вектор состояния N^k перейдет в N^{k+1}. Этот переход обусловлен различными событиями, которые происходят внутри каждой ячейки: прямое столкновение частиц и их касание, разрушение крупных частиц на более мелкие и отламывание осколков, появление трещин в крупных частицах и т. д. В результате измельчения частицы становятся меньше и, соответственно, амплитуды измеряемых сигналов – меньше. Таким образом, состояние материала в камере описывается совокупностью сигналов, записанных в ней, при этом амплитуды указанных сигналов $A^k = \{A_{i,j}\}$, связанные с размерами частиц в камере, составляют поле ячеек, соответствующих размеру частиц [11].

Изменение амплитуды записанных сигналов в ходе измельчения за шаг времени перехода по ячеечной модели вычисляется из матричного равенства $A^{k+1} = GA^k$, G – где матрица измельчения с элементами g_{ij}, значения которых можно трактовать, как вероятности перехода в другие ячейки. Эти коэффициенты образуют треугольную матрицу вероятностей перехода при измельчении.

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & ...0 & \\ g_{21} & g_{22} & 0 & ...0 \\ ... & .... & ... & \\ g_{m1} & g_{m2} & gm3 & ...1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-S_1\Delta t & 0 & ...0 \\ S_1 b_{21}\Delta t & 1-S_2\Delta t & ...0 \\ ... & .... & ... \\ S_1 b_{m1\Delta} t & S_2 b_{m2}\Delta t & ...1 \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

где S и b – селективная и распределительная функции измельчения соответственно. Селективная функция измельчения $S(A)$, описывающая скорость измельчения, в нашем случае описывает скорость уменьшения в единицу времени количества сигналов с величиной амплитуды, попадающей в ячейку (поддиапазон) A_i. Таким образом, $\Delta n_i^- = n_i S_i \Delta t$. Сигналы с пониженным уровнем амплитуды переходят в соседние ячейки, где находятся сигналы с меньшими амплитудами. Этот процесс описывается распределительной функцией $B = \{b_{ij}\}$, которая показывает вероятность перехода сигналов из *j*-й ячейки в *i*-ю. Процесс измельчения приводит к увеличению числа записанных в дискретный момент времени сигналов, помещенных в ячейке с меньшими амплитудами, на величину $\Delta n_i^+ = \sum_j b_{ij} n_i S_i \Delta t = \Delta n_i^- \sum_j b_{ij}$.

Разрушение частиц, при котором появляются сигналы с амплитудой A_i, происходит при удельной мощности сигналов P_{ij}. Элементы P_{ij} представляют собой величину удельной мощности сигнала в каждой *i*-й ячейке (т. е. поддиапазоне сигналов с величиной амплитуды A_i) на *j*-м переходе*:*

$$P(A) = \frac{1}{t}\sum_{i=1}^{m} n_i A_i^2 . \qquad (3)$$

Выражения для определения селективной и распределительной функции измельчения имеют вид:

$$S_i = \frac{1 - P_i}{\Delta t}, \quad B_i = \frac{P_i}{S_i \Delta t}. \qquad (4)$$

Таким образом, при периодической загрузке материала в мельницу матрица измельчения определяется по амплитудам записанных сигналов акустического мониторинга процесса. Этот факт используется для управления режимами измельчения.

После установления стабильной работы мельницы производительность зависит при прочих равных условиях от соотношения отдельных фракций в общем объеме материала до и после измельчения [3], поэтому важно контролировать наличие отдельных фракций в камере и в каналах за ней. Используя анализ акустических сигналов, записанных в зоне двухфазного потока за классификатором (см. рис.1), можно контролировать качество готового продукта [11].

Для создания модели третьего уровня, модели «гранулометра», т. е. описания процесса разрушения отдельной частицы, используем установленный факт [10, 12] зависимости дисперсии (разброс) характерной частоты акустических сигналов от крупности материала, транспортируемого в потоке.

Для контроля крупности материала в камере создана модель кинетики переходов материала между фракциями внутри мельницы, отраженная в изменениях характеристик записанных сигналов. Обычно при промышленном измельчении материала в технологических требованиях к готовому продукту указывается его необходимый класс крупности и допустимый процент наличия частиц класса крупнее контрольного. При моделировании для определенности используется пятифракционная модель материала при измельчении с контрольной фракцией F_5. Модель построена по следующему принципу. Существуют пять фракций F_i, $i = 1 \div 5$, имитирующих массу фракций внутри мельницы (см. рис. 4).

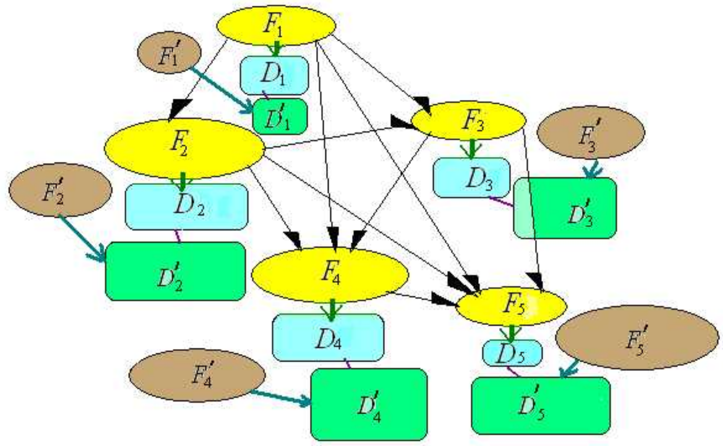

Рис. 4 – Схема кинетики гранулометрического состава материала в мельнице и изменения дисперсии характерной частоты сигналов

В начальный момент времени во фракциях F_1, F_2, F_3, F_4 находится определенная масса исходного материала. Материал в контролируемой фракции F_5 отсутствует. Предварительными исследованиями [15] для различных материалов (шлак, шамот, циркон, кварцевый песок, магнетитовый кварцит и др.) установлены характерные частоты сигналов при транспортировании фракций материала, определены зависимости дисперсии этих частот от массы соответствующей фракции. Исследования показали, что эти зависимости носят линейный характер и коэффициенты зависят от свойств материала и размера частиц фракции [12]. Поэтому для исследуемого материала достаточного одного предварительного испытания для уточнения коэффициентов зависимостей.

В момент анализа состояния материала в камере по установленным зависимостям и записанным сигналам мониторинга определяются массы фракций. Так, начальному моменту t_1 соответствовали начальные массы фракций F_i и начальные дисперсии характерной частоты D_i. В следующий момент t_2 массы фракций изменились (F_i'), и, соответственно, изменились дисперсии характерной частоты D_i' (см. рис. 4). Значение массы фракций в каждый момент времени вычисляется в соответствии с дифференциальными уравнениями:

$$d(F_i)/dt = -\sum_{j=1}^{5} k_{ij} F_j \,. \qquad (5)$$

Причем $k_{5,j} = -1$. Значения коэффициентов $k_{i,j}$, определяющих изменения гранулометрического состава, в общем случае зависят от многих параметров. Полагаем, что они определяются вероятностью перехода *i*-й фракции в *j*-ю фракцию.

Описанная модель третьего уровня дает возможность контролировать гранулометрический состав в зоне измельчения, а это значит, что известна информация о массе контролируемой фракции, выходящей из камеры измельчения. Поскольку система классификации настроена на удаление частиц контролируемого класса и мельче в бункер готового продукта, то тем самым нам известна производительность мельницы. Таким образом, наличие модели третьего уровня (модели «гранулометра») в системе контроля позволяет иметь постоянную информацию о гранулометрическом составе в зоне измельчения и производительности измельчительной установки по готовому продукту.

Далее задача разрабатываемой системы автоматического управления струйным измельчением состоит в выборе такого заполнения помольной камеры, которое бы давало требуемую производительность по выходу готового класса. Выбор оптимальной загрузки камеры осуществляется, исходя из моделей трех уровней, на основе анализа акустических сигналов рабочих зон установки. Это включает:

– определение уровня производительности на основе первой модели и запись соответствующих характеристик акустических сигналов зоны измельчения;

– определение матрицы измельчения по второй модели и контроль режима измельчения;

– контроль гранулометрического состава в камере и определение необходимого времени загрузки новой порции материала по третьей модели.

По результатам работы системы контроля режимов измельчения и анализа сигналов зоны измельчения выдается команда на изменение (пополнение) циркулирующей нагрузки и включается в работу бункер загрузки материала.

Дополнительная установка системы контроля в зоне транспортирования готового материала за классификатором по типу модели «гранулометра» позволяет вносить дополнительную поправку, делающую мониторинг качества практически непрерывным. По характеристикам записанных акустических сигналов система автоматически определяет наличие в двухфазном потоке частиц крупнее контрольного класса и указывает на необходимость корректировки режима классификации. Исключение вероятности повторного измельчения повышает качество продукции и снижает энергопотребление процесса.

Выводы. Разработан метод управления процессом измельчения, основанный на постоянном контроле гранулометрического состава материала и формировании управляющих воздействий по циркулирующей нагрузке измельчительной установки на основе анализа сигналов акустического мониторинга рабочих зон.

Построенная трехуровневая модель учитывает особенности замкнутого цикла измельчения, кинетику гранулометрического состава материала в камере измельчения и связь процесса с характеристиками акустических сигналов. Показано, что для получения высокой производительности по готовому продукту заданной крупности необходимо контролировать акустические сигналы зоны измельчения и регулировать по ним заполнение помольной камеры, поддерживая ее на оптимальном уровне.

Необходимо провести дальнейшие исследования по разработке автоматизированной системы управления измельчительной установкой, ее структурной и функциональной схемы.

1. *Андреев Е. Е., Тихонов О. Н.* Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению. СПб: Санкт-Петербургский гос. горный ун-т., 2007. 439 с.
2. *Прядко Н. С.* Развитие теории тонкого измельчения полезных ископаемых: автореферат дисс. д-ра техн. наук: 05.15.08, НГУ. Днепропетровск, 2015. 36 с.

3. *Pivnyak G. G., Pilov P. I., Pryadko N. S.* Decrease of Power Consumption in Fine Grinding of Minerals. Mine Planning and Equipment Selection C Drebenstedt and R. Singhal (eds), @ Springer International Publishing Switserland, 2014. P. 1069–1079. DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_104.
4. *Линч А. Д.* Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление: пер с англ. М.: Недра, 1981. 343 с.
5. *Утеуш Э. В., Утеуш З. В.* Управление измельчительными агрегатами. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.
6. *Марюта А. Н.* Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитно-обогатительных фабриках. М.: Недра, 1975. 231 с.
7. *Черноусько Ф. Л., Колмановский В. Б.* Оптимальное управление при случайных возмущениях. М.: Наука, 1978. 351 с.
8. *Gommeren H. J. C., Heitzmann D. A., Moolenaar J. A. C., Scarlett B.* Modelling and control of jet mill plant Powder Technology. 2000. № 108. P. 147–154.
9. *Горобец В. И.* Оптимизация параметров и разработка способа автоматического регулирования газоструйной мельницы: автореферат дисс. канд. техн. наук: 05.13.07. НГУ. Днепропетровск, 1972 г. 21 с.
10. *Терновая Е. В.* Анализ частот сигналов при транспортировании и измельчении сыпучих материалов в потоке. Збагачення корисних копалин. 2016. № 63 (104). С. 59–65.
11. *Музыка Л. В., Прядко Н. С.* Моделирование и управление работой струйной мельницы. Материалы IX-ой международной конференции «Молодые ученые 2018 – от теории к практике» (16 февраля 2018 г., Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр). С. 194–197.
12. *Прядко Н. С., Терновая Е. В.* Установление возможности оценки фракционного состава сыпучих материалов по частотным характеристикам акустических сигналов в потоке. Збагачення корисних копалин. 2017. № 67 (108). С. 161–168.

Получено 10.05.2018,
в окончательном варианте 30.05.2018