УДК 622.73

Н. С. ПРЯДКО, Н. Д. КОВАЛЕНКО, Г. А. СТРЕЛЬНИКОВ

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Систематизированы результаты проведенных в Институте технической механики (ИТМ) Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины исследований по развитию теории и технологии тонкого измельчения различных материалов. Принципиально новый подход к исследованию процесса тонкого измельчения, развиваемый в ИТМ, основан на связях акустических параметров процесса с кинетическими и энергетическими параметрами разрушения и измельчения.

Развитие теории тонкого измельчения позволило обосновать ряд новых закономерностей, положенных в основу совершенствования технологического процесса. В частности, установлено, что интенсивность образования новой поверхности при тонком измельчении твердых полезных ископаемых пропорциональна потребляемой энергии и снижается при достижении некоторой критической величины крупности продукта, обусловленной повышением прочности частиц. Показано, что кинетика измельчения узких фракций крупности материалов в смеси не зависит от соотношения других фракций. Теоретически доказано, что производительность мельницы по готовому продукту в замкнутом цикле измельчения пропорциональна содержанию в ней класса крупнее контрольного. Максимальная производительность мельницы по контрольному классу крупности достигается при минимально возможной удельной поверхности измельченного продукта заданной крупности.

Новые результаты в теории процесса тонкого измельчения создали базу для использования информационных технологий идентификации режимов струйного измельчения, позволяющих при ограниченном количестве исходных данных выбирать оптимальные технологические параметры струйного измельчения.

Систематизовано результати проведених в Інституті технічної механіки (ІТМ) Національної академії наук України і Державного космічного агентства України досліджень щодо розвитку теорії і технології тонкого подрібнення різних матеріалів. Принципово новий підхід до дослідження процесу тонкого подрібнення, що розвивається в ІТМ, базується на зв’язках акустичних параметрів з кінетичними та енергетичними параметрами руйнування й подрібнення.

Розвиток теорії тонкого подрібнення дозволив обґрунтувати ряд нових закономірностей, які лягли в основу вдосконалювання технологічного процесу. Зокрема, встановлено, що інтенсивність утворення нової поверхні при тонкому подрібненні твердих корисних копалин пропорційна споживаній енергії й знижується при досягненні деякої критичної величини крупності продукту, що обумовлена підвищенням міцності часток. Показано, що кінетика подрібнення кожної вузької фракції крупності матеріалів у суміші не залежить від співвідношення інших фракцій крупності. Теоретично доведено, що продуктивність млина щодо готового продукту в замкнутому циклі подрібнення пропорційна вмісту в млині класу крупніше контрольного. Максимальна продуктивність млина по контрольному класу крупності досягається при мінімально можливій питомій поверхні готового продукту контрольного класу крупності.

Нові результати в теорії процесу тонкого подрібнення створили базу для використання інформаційних технологій ідентифікації режимів струминного подрібнення, що дозволяє при обмеженій кількості вихідних даних виконувати вибір оптимальних технологічних параметрів процесу струминного подрібнення.

The research results of the development of a fine grinding theory and a technology for various materials obtained at the Institute of Technical Mechanics (ITM) of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine are classified. A principally new approach to the fine grinding research is based on the association of the acoustic process parameters with the kinetic and power parameters for decomposing and grinding.

The development of a fine grinding theory provided the validity of some new regularities used as a basis for improving a technological process. In particular, it is found that the intensity of a new surface formation in fine grinding solid mineral resources is proportional to the consumed energy and reduces in reaching some critical product size caused by an increase in particles strength. It is shown that grinding kinetics of the close-cut size of material fractions in mixing does not depend on relationships of other fractions. In theory, it is proved that the final mill productivity in the closed grinding cycle is proportional to the presence of a more sized class than the control one. The maximal mill productivity with a control size class is provided with a limited quantity of a minimal possible product specific surface of the grinded product of a given size.

New results in the fine grinding theory provided the base for use of information technologies of identification of fine grinding conditions to select optimal technological parameters for fine grinding with limited reference data.

Ключевые слова: *тонкое измельчение, технология, удельная поверхность, крупность частиц.*

© Н. С. Прядко, Н. Д. Коваленко, Г. А. Стрельников, 2015

Введение. В Институте технической механики (ИТМ) Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины в последнее время все больше внимания уделяют вопросам развития технологий. В годы становления ИТМ под руководством академика В. В. Пилипенко в тематике отделов стали активно развиваться новые направления, связанные с решением проблем различных областей народного хозяйства: авиационной, автомобильной, металлургической, горнорудной, топливно-энергетической и др.

Измельчение твердых материалов является одним из самых распространенных технологических процессов. Это сравнительно высокоэнергоемкий процесс, особенно при получении тонкодисперсных материалов. Так, в цементной промышленности при получении 1 т цемента на измельчение сырья тратится 50 – 60 кВт-ч, что составляет 50% общего количества энергии на его производство. Около 4% мировых энергетических затрат приходится на операции измельчения различных технических продуктов. Поэтому снижение энергопотребления измельчительных установок при достижении требуемой дисперсности продукта является актуальной задачей.

Постановка задачи. Принципиально новый подход к совершенствованию тонкого измельчения, развиваемый в ИТМ, основан на связях акустических характеристик процесса с его кинетическими и энергетическими параметрами. Задачей развиваемой теории тонкого измельчения было обоснование новых положений для совершенствования технологии тонкого измельчения и проверка их на примере струйного измельчения.

Цель работы – систематизация проведенных в ИТМ исследований в области разрушения и измельчения, разработка новых решений по развитию теории и технологии тонкого измельчения.

Для описания процессов измельчения используются различные гипотезы энергетической оценки дробления и измельчения, которые выражаются уравнением энергии $dE = -Kdx / x^n$ (здесь E – энергия, x – размер частиц, K – коэффициент формы частиц) с различными значениями параметра n. Выбор гипотезы зависит от области ее применения. Так, гипотеза Риттингера, предполагавшего, что расход энергии на дробление пропорционален величине вновь образованной поверхности, хорошо согласуется с практикой тонкого измельчения (при получении продуктов с контрольным классом менее 40 мкм). Однако, в разных отраслях промышленности нужны тонкодисперсные продукты с разными свойствами. В технологии получения цемента дисперсность готового продукта оценивается по образованной удельной поверхности. В горнорудной промышленности, где необходимо получить продукт определенного гранулометрического состава, избегают образования переизмельченных частиц, отрицательно влияющих на последующие операции обработки руд.

В исследованиях ИТМ решалась задача проверки применимости гипотезы Риттингера для описания процесса тонкого измельчения руд и доказательства гипотезы независимости кинетики измельчения узких фракций материала в ходе измельчения.

Анализ результатов тонкого измельчения полезных ископаемых в барабанных и струйных мельницах (наиболее используемых для получения тонкодисперсных материалов) показал существование зависимости $S_{уд}(Э_{уд})$, связывающей вновь образованную удельную поверхность ($S_{уд}$) при измельчении материала с энергозатратами ($Э_{уд}$) на этот процесс. Установлена неизменность характера зависимости. При этом коэффициент пропорциональности в зависимости меняется при переходе к тонкому, а затем и сверхтонкому измельчению. Это уточняет гипотезу Риттингера, распространяя ее на область получения сверхтонких материалов. Было установлено также существование критического уровня энергопотребления, переход через который характеризует значительное повышение энергопотребления и достижение предельных возможностей механического раскрытия ценных компонентов [1]. При этом наблюдается тенденция снижения удельной производительности с повышением содержания требуемого готового класса в продукте измельчения.

На рис. 1 показана связь удельной производительности по готовому классу (q_{74}) и содержания готового класса (-74 мкм) в песках рудоразмольных барабанных мельниц горно-обогатительных комбинатов Криворожского железорудного бассейна: 1 – Южный, 2 – Ново-Криворожский, 3 – Центральный, 4 – Северный, 5 – Ингулецкий.

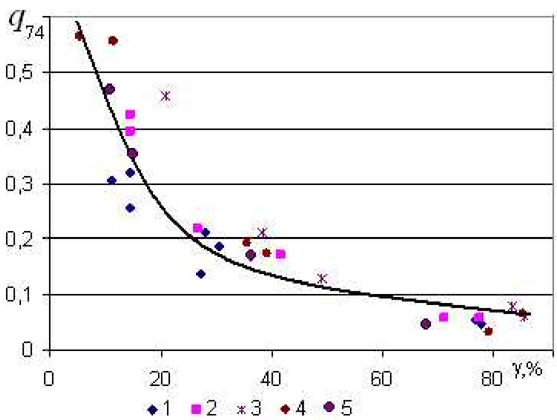


Рис. 1 – Зависимость удельной производительности по готовому классу от содержания готового класса в песках рудоразмольных мельниц горно-обогатительных комбинатов Криворожского железорудного бассейна

Струйное измельчение обеспечивает получение более тонкого продукта ($S_{уд}$ до 8000 $см^2/г$), чем при шаровом измельчении. На рис. 2 показаны зависимости удельной поверхности от энергоемкости для тонкого измельчения в струйной (1) и шаровой (2) мельницах.

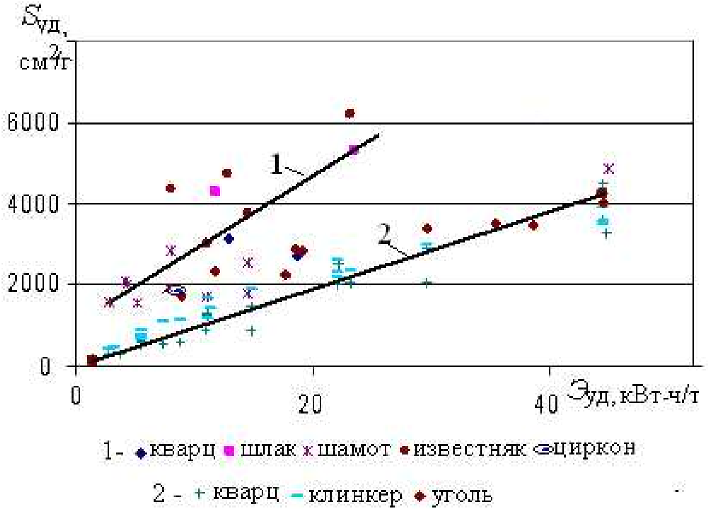


Рис. 2 – Зависимости удельной поверхности продуктов от удельных энергозатрат при измельчении

Эти зависимости имеют вид:
для струйной мельницы

$$S_{уд}^{1} = 182{,}4Э_{уд} + 1057{,}5\,, \tag{1}$$

для шаровой мельницы –

$$S_{уд}^{2} = 95{,}5Э_{уд} + 28{,}2 \tag{2}$$

Коэффициенты уравнений характеризуют повышенную динамичность струйного измельчения (k_1= 182,4) сравнительно с шаровым (k_2 = 95,5) способом. В результате при струйном измельчении достигаются значительно меньшие размеры частиц.

Установлено повышение энергоемкости мельниц при достижении определенной величины размера частиц продуктов. Так, для струйного измельчения это 10 – 15 мкм, тогда как для шарового измельчения – 40 – 60 мкм. Прочность частиц Ω увеличивается с уменьшением их размера d, особенно в области размеров частиц менее 2,5 мм. Это подтверждается экспериментально установленной закономерностью на примере тонкого измельчения клинкера и известняка [2] в виде: $\Omega(d) = 88{,}2d^{-0{,}872}$ (с коэффициентом корреляции R = 97,5).

Таким образом, можно утверждать, что интенсивность образования новой поверхности при тонком измельчении материалов прямо пропорциональна потребляемой энергии и снижается при достижении критической величины крупности измельченного продукта (15 – 25 мкм в зависимости от материала), что обусловлено повышением прочности частиц. Отсюда следует, что основная задача тонкого измельчения – определение условия перехода процесса измельчения через критический уровень как в сторону увеличения, так и сторону уменьшения интенсивности. При этом необходимо определить по состоянию цикла измельчения момент перехода режимом измельчения критического уровня и выбрать скачок изменения производительности по исходному материалу. Решение этих задач позволит решить проблему создания оптимальных условий сверхтонкого помола. Это указывает на тот факт, что для получения высокой производительности по тонкому продукту необходимо управлять процессом. Оптимизацию производительности мельницы и управление процессом тонкого измельчения предлагается осуществлять с использованием математического моделирования и информационных технологий.

Основой моделирования служили результаты исследования кинетики измельчения фракций поликомпонентных минеральных систем, включающих минералы с различной прочностью и измельчаемостью. Сыпучий материал рассматривался как смесь отдельных фракций частиц различного размера, разделенных на классы в соответствии с гранулометрическим составом исходного материала. На основе независимости результатов измельчения разнопрочных компонентов в смеси полагалось, что узкие фракции, находясь в составе смеси, измельчаются по разным законам. Экспериментальные измельчения узких фракций и исходной смеси различных материалов в струйной и шаровой мельницах [3] подтверждают закономерность независимости кинетики измельчения каждой узкой фракции в смеси. На основе этого разработан комплексный подход к анализу кинетики процесса измельчения, учитывающий как кинетику вновь образованной удельной поверхности, так и закономерности сокращения крупности.

Процесс тонкого измельчения в мельницах разного типа оценивался математическим ожиданием $Mx(t) = \sum_{i=1}^{N} (\yen_i \bar{d}_i)$ и стандартным отклонением $\pm$ гранулометрического состава материала:

$$\begin{cases} Mx(t) = a_1 t^2 - a_2 t + a_3 \\ \pm(t) = b_1 t^2 - b_2 t + b_3 \end{cases}, \qquad (3)$$

где t – время измельчения, $\yen_i, \bar{d}_i$ – выход класса крупности материала (%) и средний диаметр частиц этого класса соответственно, N – число классов.

Установлено, что коэффициенты a_i , b_i зависят от свойств материала и типа мельницы (струйная, шаровая и стержневая) [4]. Анализ коэффициентов уравнения зависимости $\pm(t)$ по знаку позволяет судить о степени завершенности процесса измельчения до заданной удельной поверхности или крупности.

Уравнение для вновь образованной удельной поверхности материала с учетом выражения для математического ожидания распределения гранулометрического состава имеет вид:

$$S = k_s M \cdot 1/x(t), \qquad (4)$$

где k_s – коэффициент поверхности частиц, учитывающий различие площади поверхности реальных частиц и соответствующих сферических частиц, равновеликих им по объему, x – крупность класса. Показано, что при определении величины коэффициента k_s учет вклада классов мелких частиц (менее 40 мкм) позволяет уменьшить погрешности расчетов удельной поверхности на порядок.

Экспериментально установлена связь коэффициента поверхности k_s с плотностью ρ и удельной поверхностью материала:

$$k_s = 0{,}88\rho^2 - 8{,}7\rho + 26{,}66; \quad k_s = 0{,}002 S_{уд} - 1{,}13. \qquad (5)$$

Использование уравнений (3) – (5) позволяет прогнозировать кинетику измельчения на основе контроля дисперсности по коэффициентам уравнения стандартного отклонения грансостава и, таким образом, исключить переизмельчение материала и переход критического уровня режима измельчения.

Учитывая, что прирост вновь образованной поверхности, согласно гипотезе Риттингера, пропорционален потраченной на ее образование энергии, снижение энергоемкости измельчения возможно при снижении удельной поверхности продукта. Однако увеличившейся поверхности соответствует новая дисперсность, которая описывается соответствующей функцией распределения. Показано, что оптимизировать процесс измельчения следует, взяв за основу целевую функцию $s \Rightarrow s_{min}$ при достижении заданного (технологией последующего использования измельченного продукта) содержания в нем контрольного класса крупности (a), т. е. $\beta_{-a} = \int_0^a \varphi(x)dx$ (здесь φ – функция распределения грансостава). Тогда максимальная производительность мельницы по вновь образованному контрольному классу крупности достигается при минимально возможной удельной поверхности измельченного продукта с заданным содержанием контрольного класса крупности.

Уравнения (3) были использованы для вычисления скорости измельчения фракций [4]. Результаты струйного измельчения шлака, измельчения полиметаллической руды в шаровой мельнице и бедных медно-никелевых руд в стержневой и шаровой мельнице позволили обосновать схемы измельчения на основе вычисления скорости измельчения материалов.

Чтобы избежать переизмельчения и получить тонкодисперсный продукт, в обогатительной практике используют замкнутые циклы измельчения, в которых измельченный продукт подается в классифицирующий аппарат, где тонкий (готовый) продукт выводится из измельчительного цикла, а более грубый продукт направляется снова в этот же измельчительный аппарат (рис. 3).

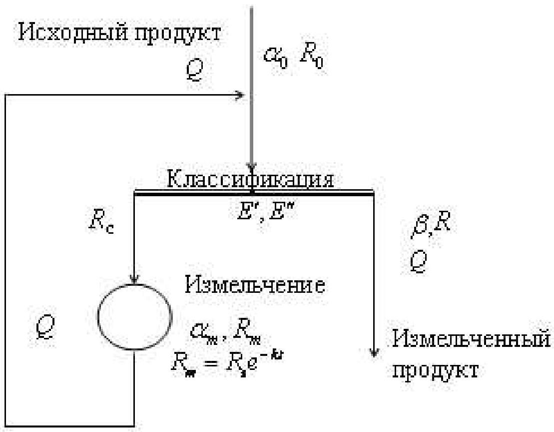


Рис. 3 – Схема измельчения материала в замкнутом цикле с совмещением предварительной и контрольной классификации

При анализе замкнутых циклов процесс измельчения рассматривается как превращение крупных классов в мелкие. Модели рассматриваемых замкнутых циклов измельчения составляются [5] на основе уравнений баланса расчетного класса в операции классификации (E', E'' – классы крупности менее и более расчетного соответственно) и смешения продуктов. В качестве показателя, характеризующего крупность продукта, используется величина остатка *R* на контрольном сите при объеме материала *Q*. Исследование позволило получить зависимость для удельной производительности мельницы q_a^V по вновь образованному контрольному классу a при выполнении технологического задания получения требуемой дисперсности измельченного продукта β. Величину q_a^V рекомендуется принимать в качестве характеристики мельницы при измельчении данной руды и использовать в уравнении кинетики измельчения, а также для расчета производительности замкнутых циклов измельчения.

Теоретические положения подтверждены при имитационном моделировании процесса измельчения в замкнутых циклах, основанном на дискретно-событийном подходе моделирования стохастических динамических процессов.

Программный комплекс моделирования процесса измельчения состоит из двух подсистем:

1) модель кинетики движения материала в замкнутой системе при непрерывном измельчении;

2) модель кинетики переходов материала между фракциями внутри мельницы.

Первая модель показала зависимость производительности мельницы от режима загрузки при работе в замкнутом цикле, при этом производительность измельчительной установки возможно повысить на 1,4 % [6]. Во второй модели был введен коэффициент-переключатель, контролирующий удельную поверхность, вычисляемую по составу фракций в зоне измельчения. После переключения на режим контроля переизмельчения ($K > 1$), т. е. при условии минимальной удельной поверхности при заданном выходе контрольного класса, наблюдается повышение производительности на 5 – 7% при прочих равных условиях [1].

Разработана математическая модель процесса тонкого измельчения материалов в рамках теории цепей Маркова с использованием результатов акустического мониторинга процесса. Особенность модели состоит в том, что (в отличие от существующих ячеечных моделей) фракционные массопотоки в измельчительной установке в различных режимах ее работы связываются с акустическими характеристиками зоны измельчения. Для создания модели на примере измельчения в струйной мельнице весь диапазон акустических сигналов (АС), регистрируемых в зоне измельчения, разбивается на поддиапазоны со средними размерами амплитуды $A_i, i = 1,2,..m$, где $i = 1$ соответствует $A_{\max}$. Таким образом, все сигналы разбиваются на *m* ячеек по размерам их амплитуд. Число сигналов с соответствующими амплитудами определяет состояние элементарной ячейки. Количество АС может быть представлено вектором-столбцом $N = (n_i), i = 1, 2,...m$, где n_i – число АС *i*-й ячейки, т. е. число сигналов, имеющих амплитуду A_i. При моделировании кинетики струйного измельчения процесс рассматривается как последовательность малых промежутков времени Δt – времени перехода. Тогда текущие моменты времени процесса и записи акустического мониторинга будут определяться как $t_k = k\Delta t$, где целое число $k = 1, 2,\ldots$ – номер перехода. За k-й переход вектор состояния N^k перейдет в N^{k+1}. Более подробно модель описана в [7].

Результаты моделирования струйного измельчения проверены экспериментальными исследованиями струйного измельчения материалов различных физико-химических свойств с применением акустического мониторинга процесса. Испытания проводились на экспериментальных стендах ИТМ производительностью 0,2 кг/ч (рис. 4а – УСИ-02), 20 кг/ч (рис. 4б – УСИ-20) и промышленной мельнице (рис. 4в) Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК), Измельчитель включает струйную помольную камеру, классификатор, циклон, систему подачи и очистки энергоносителя.

Акустические сигналы фиксировались волноводом (на рис. 4в – цилиндр в центре помольной камеры) в зоне измельчения и передавались датчиком через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на компьютер. Специальные программы обрабатывали сигналы и определяли их характеристики [8].

Акустические основы мониторинга технологии тонкого измельчения включают установление взаимосвязи эффектов измельчения и диспергирования (производительности, размера частиц, удельной поверхности продукта) с акустическими характеристиками зоны помола (суммарным и частным счетом акустических сигналов, величинами амплитуд), что позволяет производить выбор оптимального режима работы мельницы.

а *б* *в*

Рис. 4 – Экспериментальные стенды ИТМ и помольная камера мельницы ВГМК

Исходя из физической сути процесса струйного измельчения, были выделены и изучены следующие режимы: 1 – начало загрузки струй материалом, 2 – оптимальный рабочий режим, 3 – режим разгрузки и 4 – режим перегрузки струй, за которым может наступить “завал” (аварийная остановка) помольной камеры.

Установлены связи акустических параметров с режимами измельчения [9]. Изменение режима струйного измельчения, включая подачу в струю материала, различные состояния струй по содержанию твердой фазы и динамичности разрушения частиц обусловливают изменения амплитудных распределений акустических сигналов в зоне помола. При этом повышение уровня акустической активности зоны помола на любой стадии является фактором роста числа ударов частиц и, следовательно, интенсификации измельчения и увеличения производительности мельницы.

Исследовалось влияние крупности исходных сыпучих материалов на акустические параметры. Проведенный акустоэмиссионный мониторинг кинетики струйного измельчения шамота позволил установить, что увеличение крупности измельчаемых частиц на порядок (в экспериментах от 0,3 до 3 мм) увеличивает более чем на порядок значение амплитуд АС как при загрузке струй, так и в рабочем режиме измельчения при прочих равных условиях (параметры энергоносителя, режим классификации). Выявлена линейная корреляционная связь среднего размера ($\bar{d}$ = 1 – 6 мкм) частиц (циркона) с величиной его удельной поверхности (по опытным данным измерений на приборе «MALVERN») в диапазоне $S_{уд}$ = 0,4 – 1,6 м^2/г.

Изменение размеров частиц в процессе струйного измельчения характеризуется следующими закономерностями изменения амплитуд акустических сигналов и их распределений:

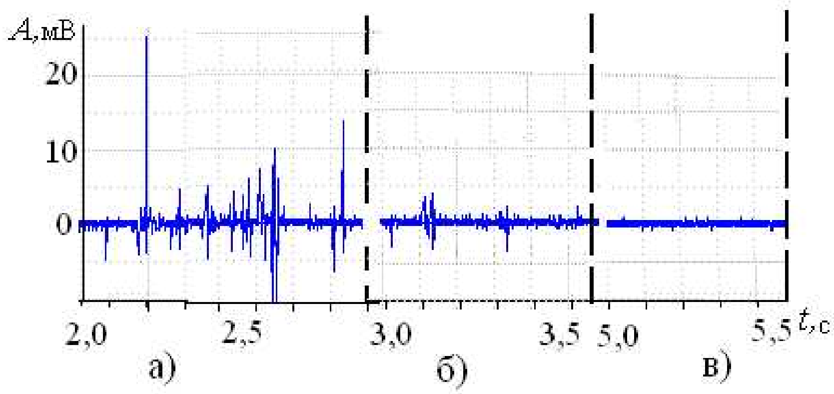
– В начале рабочего режима измельчения максимальные значения амплитуд АС коррелируют с размерами измельчаемых частиц. По завершении стадии разгрузки струй величина амплитуды АС коррелирует с параметром дисперсности $S_{уд}$ (удельной поверхности) измельченного продукта.

– Угол наклона зависимости амплитуды АС от размера частиц $A(d)$ изменяется с изменением плотности измельчаемого материала: чем выше плотность материала при прочих равных условиях, тем значительнее влияние размера частиц на величину амплитуды АС. Это влияние наиболее существенно при крупности частиц выше 0,2 мм.

– Признаком возрастающего эффекта диспергирования, при прочих равных условиях, является увеличение доли малоамплитудных АС (в экспериментах – менее 0,04 В при частоте регистрации сигналов 400 кГц) в измеряемом счете АС.

Проведенное акустическое наблюдение параметров и показателей процесса струйного измельчения различных материалов (уголь, доменный шлак, шамот, известняк, кварцевый песок, циркон) показало полезность акустической информации для диагностики состояния струй, эффективности их работы в аспекте производительности мельницы, а также для контроля дисперсности измельченного продукта.

Использование двух датчиков в различных зонах струйной установки дало возможность контролировать качество измельчения. При нарушении технологии измельчения могут возникать нарушения дисперсности продукта, при этом возрастает выход продукта классом выше контрольного, т. е. $R_{63} > 3$ %. Акустический мониторинг позволяет контролировать качество измельченного материала по амплитуде A (мВ) акустических сигналов зоны классификации. На рис. 5 представлены записи акустических сигналов в условиях работы промышленной мельницы на ВГМК.



а) некондиционное качество: R_{63} > 3%; б) допустимое качество: R_{63} = 1,5%;
в) оптимальное качество: R_{63} = 0 – 0,5%.

Рис. 5 – Записи акустических сигналов при измельчении циркона на ВГМК

Исследовалось влияние подогрева энергоносителя на эффективность измельчения. Показано преимущество использования подогрева энергоносителя в теплообменнике. При этом готовый продукт сверхтонкого измельчения получают без нежелательных посторонних примесей. На установке ИТМ струйного измельчения (УСИ-20) исследовался процесс измельчения с нагревом энергоносителя различных материалов: шамота, шлака, карбида бора, технического мела. Установлено, что работа струйной мельницы с нагретым энергоносителем является более эффективным вариантом технологии измельчения. В экспериментах при давлении энергоносителя P = 0,25 МПа, числе оборотов ротора классификатора n = 2000 – 3000 мин$^{-1}$ производительность мельницы увеличивалась до 4 раз по сравнению с вариантом без подогрева.

Проведенные исследования (на примере струйного измельчения различных гетерогенных материалов: уголь, доменный шлак, шамот, известняк, кварцевый песок, циркон) позволяют сделать следующие выводы.

Основу информационной акустической диагностики процесса тонкого измельчения без применения специальных мелющих тел или устройств могут составить следующие принципы.

1. Смена режима загрузки струй (начало подачи материала, рабочий режим измельчения, разгрузка струй) сопровождается изменением плотности потока частиц в струях и, соответственно, вероятности разрушающих ударов на частицы, что приводит к изменению активности $\dot{N}$ АС. Постоянство уровня высокой активности $\dot{N}$ АС в зоне помола (порядка $\lg \dot{N}$ = 5,2 – 5,4 для исследованных материалов) характеризует условие достижения максимальной эффективности струйного измельчения.

2. Изменение размеров частиц в процессе измельчения сопровождается изменением значений амплитуд акустических сигналов. Максимальные значения амплитуд АС на стадии завершения разгрузки струй коррелируют с параметром дисперсности $S_{уд}$ (удельной поверхности) измельченного продукта. Признаком возрастающего эффекта диспергирования при прочих равных условиях является увеличение доли малоамплитудных АС в измеряемом счете АС.

Обработка опытных данных акустического мониторинга работы струйной мельницы с целью прогнозирования эффективности процесса тонкого измельчения и дисперсности готового продукта должна включать установление следующих параметров и зависимостей:

– кинетику активности $\dot{N}$ АС в рабочем режиме зоны измельчения;

– уровень максимальных (от десятых долей до единиц вольта) значений $A_{мах}$ амплитуд АС при максимальной (порядка 105 и выше) активности $\dot{N}$ АС;

– долю $\dot{N}$ (A_{-40}) счета акустических сигналов малой (менее 0,04 В) амплитуды на стадии завершения разгрузки струй;

– амплитудные распределения АС по величине – для контроля границы перехода рабочего режима в стадию разгрузки струй;

– амплитудные распределения АС по величине, фиксируемые после выхода продукта из классификатора – для контроля качества измельченного продукта.

На основе проведенного акустического мониторинга процесса измельчения созданы базы данных акустических и технологических параметров процесса измельчения различных сыпучих материалов и разработана система идентификации процесса тонкого измельчения [10, 11]. Некоторые способы защищены патентами Украины (см. рис. 6).

Рис. 6 – Способы оптимизации тонкого измельчения на основе результатов акустического мониторинга процесса

Установленные принципы оптимизации тонкого измельчения используются при разработке системы управления работой струйных измельчительных установок, предназначенных для получения из сыпучих твердых материалов порошков дисперсностью $S_{уд}$ (м^2/г) порядка от долей до нескольких единиц.

На основе анализа технологических и акустических параметров установлена связь энергопотребления процесса измельчения с характеристиками акустических сигналов. Это позволило выявить акустические энергетические параметры и исследовать их кинетику в условиях промышленного измельчения циркона на струйной мельнице ВГМК [14]. Установлено, что диапазон минимальных значений акустической энергоемкости измельчения составляет $Э_{изм}$ = 400 – 700 имп/г, акустической энергоемкости диспергирования – $Э_{дисп}$ = 0,4 – 0,6 имп/см^2.

Анализ полученных результатов позволяет считать реальным значительное снижение удельных энергозатрат на измельчение и диспергирование за счет поддержания оптимальной загрузки струй материалом. Так, максимальная экономия энергии на процесс измельчения может составить до 190 кВт-ч/т при $S_{уд}$ порядка 1600 – 1800 см^2/г, а на процесс образования новой поверхности продукта ($\Delta S_{уд}$ = 800 – 1000 см^2/г) может составить до 140 кВт-ч/т.

Выводы.

1) На основе анализа энергетических особенностей тонкого измельчения показано изменение коэффициента пропорциональности в зависимости вновь образованной поверхности при тонком измельчении твердых полезных ископаемых от потребляемой на ее образование энергии, что стало базой контроля энергоемкости процесса.

2) Экспериментально подтверждена независимость кинетики измельчения узких фракций крупности в смеси минерального сырья, что послужило основой вычисления скорости их измельчения и разработки рекомендаций по формированию технологических схем измельчения.

3) Разработан новый метод оптимизации технологии струйного измельчения с учетом современной теории предразрушения твердого тела, включающий использование метода акустической эмиссии для мониторинга процесса измельчения. Получены теоретические и экспериментальные зависимости, характеризующие связь удельной поверхности измельчаемого материала, гранулометрического состава материала, производительности мельниц с акустическими параметрами процесса измельчения, позволившие разработать принципы оптимизации струйного измельчения.

4) Разработаны имитационная, динамическая модели тонкого измельчения в замкнутом цикле и ячеечная модель измельчаемости материала на основе результатов акустического мониторинга процесса, позволяющие идентифицировать и выбирать оптимальные режимы процесса.

5) Разработана информационная технология струйного измельчения, позволяющая при минимальном количестве начальных экспериментальных данных акустического мониторинга выполнить выбор оптимальных параметров процесса струйного измельчения для различных материалов и технологических режимов. Методы визуализации и идентификации измельчения на основе использования информационных технологий позволяют контролировать режимы работы мельницы и выбирать оптимальную ее загрузку. Прогнозирование хода процесса измельчения минералов с использованием моделирования и информационных технологий позволит снизить инерционность управления и осуществлять упреждающие управляющие воздействия для обеспечения эффективности производства тонкодисперсных порошков.

6) Разработан метод оценки энергозатрат при струйном измельчении, основу которого составляют связи технологических, акустических и энергетических показателей работы мельницы в различных областях дисперсности получаемого готового продукта. Акустический метод оценки энергозатрат на струйное измельчение включает установление акустических показателей энергоемкости измельчения и диспергирования.

1. *Прядко Н. С.* Моделирование кинетики тонкого измельчения в помольной камере / *Н. С. Прядко* // Техническая механика. – 2014. – № 2. – С. 93 – 100.
2. *Іванов А. М.* Наукове обгрунтування та створення високоефективних процесів подрібнення в помольному агрегаті з трубним млином на принципі селективності / *А. М. Иванов* // Автореферат дисерт. д-р техн. наук за спец. 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології.– НГУ «ХПІ». – 2006. – 39 с.
3. *Пилов П. И.* Кинетика измельчения смеси фракций крупности / *П. И. Пилов, Н. С. Прядко, Е. В. Терновая* // Збагачення корисних копалин. – 2014. – № 57 (98). – С. 101 – 106.
4. Исследование скорости измельчения руд мельницами различных типов / *Н. С. Прядко, Г. А. Стрельников, Е. В. Терновая, В. А.Грушко, Н. Ю. Пясецкий* // Техническая механика. – 2014. – № 3. – С. 114 – 121.
5. *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.
6. *Прядко Н. С.* Имитационная модель кинетики тонкого измельчения материалов / *Н. С. Прядко, Г. М. Саксонов, Е. В. Терновая* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – Вып. 53 (1095). – С. 89 – 97.
7. *Прядко Н. С.* Моделирование процесса струйного измельчения на основе акустического мониторинга / *Н. С. Прядко* // Техническая механика . – 2012. – №3. – С.179 – 184.
8. *Прядко Н. С.* Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения / *Н. С. Прядко* // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 6. – С. 46 – 52.
9. *Прядко Н. С.* Акустические исследования струйного измельчения// LAP LAMBERT Academic Publishing.–OmniScriptum GmbH&Co.Kg. – 2013. – Saarbrucken Germany. –172 с.
10. *Прядко Н. С.* Информационные технологии для управления тонким измельчением / *Н. С. Прядко, Г. А. Стрельников* // Техническая механика. – 2014. – №4. – С. 118 – 125.
11. *Pryadko N. S.* Optimization of fine grinding on the acoustic monitoring basis / *N. S. Pryadko* // Power Engineering, Control & Information Technologies in Geotechnical Systems. –Taylor & Francis Group, London, 2015. – P. 99 – 108.
12. *Pilov P. I.* Research of acoustic monitoring regularities in a jet grinding process / *P. I. Pilov, L. J. Gorobets, N. S. Pryadko* // Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 54 (2009), № 4. – P. 841 – 848.
13. *Pivnyak G. G.* Decrease of Power Consumption in Fine Grinding of Minerals / *G. G. Pivnyak, P. I. Pilov, N. S. Pryadko* // Mine Planning and Equip-ment Selection C Drebenstedt and R. Singhal (eds), DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_104@ Springer Interna-tional Publishing Switserland. – 2014. – P. 1069 – 1079.
14. *Прядко Н. С.* Спосіб газоструминного подрібнення сипучого матеріалу // Патент № 98182 від 25.04.2012, бюл. №8, заявка № а 201008111від 10.01.2012

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

Получено 08.10.2015,
в окончательном варианте 22.10.2015