УДК 622.73

Н. С. ПРЯДКО, Г. А. СТРЕЛЬНИКОВ

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТОНКИМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ

Цель работы – определение условий снижения энергоемкости тонкого помола при соблюдении необходимого выхода тонкодисперсного продукта на основе результатов акустического мониторинга процесса измельчения с применением информационных технологий. На основе обобщения результатов исследований разработана информационная технология струйного измельчения, позволяющая при минимальном количестве начальных экспериментальных данных акустического мониторинга процесса измельчения выполнить выбор его оптимальных параметров для различных материалов и технологических режимов. Определены основные технолого-акустические критерии работы измельчительной установки, давшие возможность оптимизировать процесс измельчения. Разработан метод оценки энергозатрат, основу которого составляют связи технологических, акустических и энергетических показателей работы мельницы в различных областях дисперсности получаемого готового продукта. Прогнозирование хода процесса измельчения минералов с использованием моделирования и информационных технологий позволит снизить его инерционность и осуществлять упреждающие управляющие воздействия для обеспечения эффективности производства тонкодисперсных порошков.

На основі узагальнення результатів досліджень розроблено інформаційну технологію струминного подрібнення, що дозволяє при мінімальній кількості початкових експериментальних даних акустичного моніторингу виконати вибір оптимальних параметрів процесу струминного подрібнення для різних матеріалів і технологічних режимів. Визначено основні технолого-акустичні критерії роботи млина, що дають можливість оптимізувати процес подрібнення. Розроблено метод оцінки енерговитрат, основу якого становлять зв'язки технологічних, акустичних і енергетичних показників роботи млина в різних областях дисперсності одержуваного готового продукту. Прогнозування ходу процесу здрібнювання мінералів з використанням моделювання й інформаційних технологій дозволить знизити його інерційність і здійснювати керуючі попереджуючі дії для забезпечення ефективності виробництва тонкодисперсних порошків.

The research aim is to define conditions for lowering in the power consumption of fine grinding in conditions of a necessary yield of the fine dispersion product, based on the results of acoustic monitoring for grinding using information technologies. The information technology for jet grinding is developed generalizing the research results. It allows the selection of optimal parameters for different materials and technological conditions with minimum initial experimental data of grinding acoustic monitoring. The main technological-acoustic operational criteria of the jet mill are determined resulting in the optimization of grinding. Based on technological, acoustic and power parameters of the mill operation in different dispersion areas of the final product, the method of power consumption evaluation is developed. Forecasting for mineral grinding using the simulation and information technologies results in reduction of its inertia and predicted control actions for providing the efficiency of production of fine dispersion powders.

Ключевые слова: *информационные технологии, струйное измельчение, критерии, акустичекий мониторинг, энергоемкость, эффективность*

Введение. Измельчение является важным этапом подготовительных процессов в обогащении полезных ископаемых. Эффективность обогащения полезных ископаемых определяется, прежде всего, качеством, объемом полученных продуктов обогащения и необходимыми для этого технологическими и производственными ресурсами. Тонкое измельчение – наиболее энергоемкий подготовительный процесс в технологическом замкнутом цикле обогащения. Поэтому крайне важно создавать и совершенствовать системы управления процессом измельчения в направлении повышения производительности мельниц, а значит, снижения энергоемкости процесса при соблюдении требуемого качества продукта. Прогресс в оптимизации обогатительного производства невозможен без широкого привлечения современных информационных технологий (ИТ), характеризуемых широким спектром функций.

Сложность и многофакторность процессов переработки полезных ископаемых в условиях реального производства накладывает существенные огра-

ничения при создании адекватных моделей управляемых процессов [1]. Поэтому полученные результаты [2] в области применения акустического мониторинга при совместном использовании различных методов и технологий компьютерного моделирования процессов струйного измельчения могут использоваться при создании информационных систем принятия решений по управлению непрерывными производственными процессами измельчения.

Постановка задачи. К технологическим задачам создания информационно-аналитической среды поддержки управления процессами обогащения в горнометаллургическом производстве относятся задачи практической реализации инструментальных средств ИТ. Это базы данных и средства целевого доступа к ним, подсистемы анализа данных и моделирования, интерфейсные средства оповещения и представления рекомендаций и т. д., а также задачи создания системы сбора оперативной информации о протекании процесса, включающие как автоматические измерения параметров и характеристик, так и ввод данных, получаемых с участием человека.

Однако результаты, имеющие теоретическую значимость и практическое применение в лабораторных исследованиях, крайне редко могут быть использованы для поддержки принятия решений по управлению реальным производственным процессом. Это обусловлено рядом причин [3], в частности:

- наличием в производственном процессе трудноуправляемых возмущений, не учитываемых в моделях, полученных на основе теоретических закономерностей процесса измельчения;
- неспособностью производственных аппаратов быстро адаптироваться к изменению характеристик сырья и технологических ресурсов;
- влиянием фактора экономической эффективности производства.

Поэтому необходимо создать информационный комплекс управления процессом измельчения в замкнутом цикле, работающий без остановки технологического процесса на основе результатов непрерывного акустического мониторинга параметров процесса.

Цель работы – определение условий снижения энергоемкости тонкого помола при соблюдении необходимого выхода тонкодисперсного продукта на основе результатов акустического мониторинга процесса измельчения с применением ИТ.

На основе внедрения ИТ оказалось возможным создание проблемно-ориентированной информационной системы. Информация, полученная в ходе акустического мониторинга, проходит предварительную обработку и накапливается в базе данных. Наряду с использованием информационных систем и систем графической идентификации, используются и специализированные средства математического моделирования процесса тонкого измельчения в замкнутом цикле.

На рис. 1 показана укрупненная схема использования ИТ в процессе принятия решений по управлению процессами измельчения минерального сырья.

Представляется целесообразным выделение основных групп данных, которыми оперируют системы информационной поддержки управления процессами измельчения. К ним можно отнести данные, содержащие:

- характеристики исходного минерального сырья;

– характеристики оборудования;
– технологические параметры процесса;
– управляющие акустические параметры;
– показатели, определяющие эффективность измельчения.

Рис. 1 – Схема использования средств информационной поддержки в управлении процессами измельчения

Результат работы информационной системы должен явно или опосредованно давать значения технологических параметров измельчения при определенных характеристиках питания, условиях эксплуатации измельчительного оборудования, требуемой дисперсности продукта измельчения.

На основе методики акустического мониторинга зоны измельчения и классификации [4 – 7] можно определить базу данных акустических параметров и технологических показателей струйного измельчения.

Вышеизложенное позволяет установить взаимосвязи основных технологических и акустических параметров и выделить следующие закономерности акустического излучения струйной установки:

– амплитуда акустических сигналов (АС) и ее распределение по величине характеризуют степень загрузки струй энергоносителя твердой фазой;
– величина амплитуды АС в характерных состояниях струй (разгрузка и завал) при измельчении имеет значительные различия – до нескольких порядков, что позволяет эффективно применять акустический мониторинг для регулирования процесса газоструйного измельчения;
– избыточная загрузка струй материалом сопровождается уменьшением амплитуды акустического излучения, что указывает на снижение динамичности измельчения.

Следует отметить, что процесс накопления в спектрах акустических сигналов с малыми значениями амплитуд (порядка 5 – 40 мВ) характеризует преимущественное содержание в струе частиц малых размеров, т. е. преобладание в кинетике измельчения эффектов диспергирования материала. При

исследовании процесса измельчения на лабораторной установке струйного измельчения УСИ-20 Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ) установлены связи акустических параметров с удельной поверхностью $S_{уд}$ готового продукта измельчения. На рис. 2 зависимости величины максимальной амплитуды $A_{мах}$ и доли малоамплитудных сигналов $N(A_{-40})$ от удельной поверхности измельченных материалов иллюстрируют характер амплитудно-частотных характеристик процесса струйного измельчения при изменении удельной поверхности $S_{уд}$. Повышение дисперсности измельчаемого материала сопровождается уменьшением характерной (максимальной) величины амплитуды $A_{мах}$ и ростом доли малоамплитудных сигналов (т. е. относительной доли $N(A_{-40})$ сигналов с амплитудой менее 40 мВ).

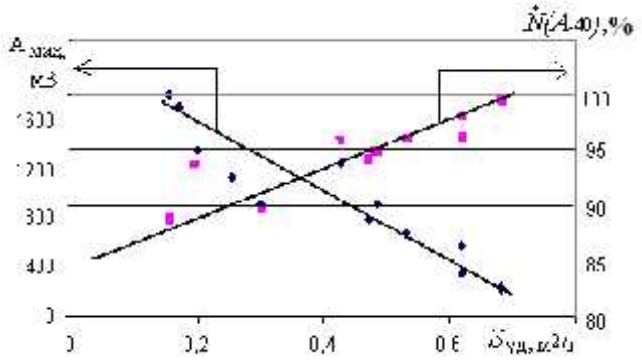

Рис. 2 – Зависимости величины максимальной амплитуды и доли малоамплитудных сигналов от удельной поверхности измельченных материалов плотностью 2,8 – 3,0 г/см^3

Инфомационные технологии струйного измельчения в основном базируются на следующих акусто-технологических критериях:

– критерий оптимальной работы мельницы: $K_{опт} = A_{мах} \cdot \dot{N}_{\Sigma}$ (В/с);

– критерий эффективности измельчения: $K_{эфф} = G / \dot{N}_{\Sigma}$ (г/имп);

– критерий эффективности диспергирования: $K_S = G \cdot S_{уд} / \dot{N}_{\Sigma}$ (см^2/имп);

– акустический показатель энергоемкости измельчения $Э_{изм}$ (имп/г) – величина, обратная $K_{эфф}$;

– акустический показатель энергоемкости диспергирования $Э_{дисп}$ (имп/см^2) – величина, обратная K_S,

где G – производительность мельницы; N_{Σ} – общее количество сигналов в счетный промежуток времени.

На основе этих критериев разработана система оптимизации процесса измельчения и прогнозирования дисперсности измельченного продукта. В частности, выявленная связь критерия эффективности с удельной поверхностью позволяет контролировать показатель дисперсности продуктов ($S_{уд}$, см^2/г) (см. рис. 3) .

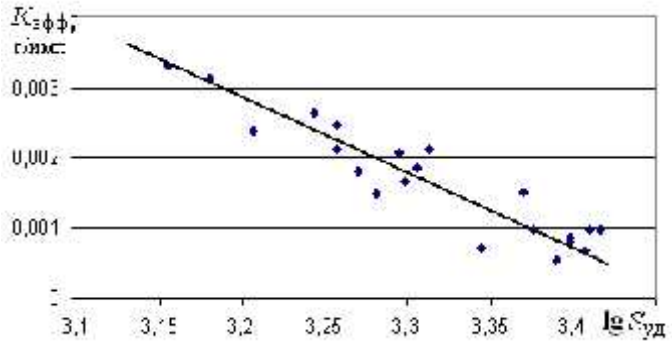

Рис. 3 – Зависимость коэффициента эффективности от удельной поверхности измельченных материалов

Учитывая большую энергоемкость тонкого измельчения, особое внимание при оптимизации уделяется снижению энергопотребления мельницы и определению оптимального режима измельчения для получения продуктов заданной крупности при минимальной энергоемкости. С этой целью определены акустические параметры энергоемкости, позволяющие контролировать энергопотребление в ходе измельчения без остановки процесса. Подтверждены тенденции снижения удельных акустических энергозатрат $Э_{изм}$ (имп/г) и $Э_{дисп}$ (имп/см^2) с повышением производительности мельницы (см. рис. 4). На основе установленной зависимости акустических параметров от производительности мельницы можно прогнозировать энергоемкость как измельчения $Э_{изм}$, так и диспергирования $Э_{дисп}$. Например, увеличение производительности от 0,7 до 1,3 г/с сопровождается уменьшением значений акустических показателей энергоемкости измельчения и диспергирования (кварцевого песка) соответственно в 2 и 1,5 раза.

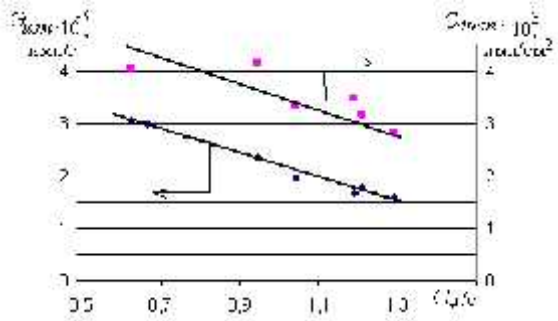

Рис. 4. – Зависимости показателей энергоемкости измельчения $Э_{изм}$ и диспергирования $Э_{дисп}$ кварцевого песка от производительности лабораторной струйной мельницы УСИ-20 (при давлении энергоносителя P_0 = 0,3 МПа, оборотах классификатора n = 2500 – 3000 мин$^{-1}$, $S_{уд}$ = 0,48 – 0,75 см^2 /г).

Анализ приведенных данных показывает, что значения акустической энергоемкости измельчения $Э_{изм}$ (имп/г) и диспергирования $Э_{дисп}$ (имп/см^2) отличаются для оптимального и неоптимального режима измельчения. Так, при изменении производительности G от 800 до 1400 кг/ч (n = 80 – 107 мин$^{-1}$) энергозатраты на измельчение уменьшаются (от 843 до 381 имп/г). Переход к

оптимальным условиям диспергирования позволяет уменьшить удельные энергозатраты в 2 – 2,5 раза.

Рассмотрение энергопотребления конкретной мельницы производительностью $G_{опт}$ = 1,02 т/ч, $G_{неопт}$ = 0,43 т/ч при мощности привода компрессора N = 285 кВт дает расчетную среднюю величину экономии удельных энергозатрат $\Delta E_{уд}$ = 659,7 – 278,7 = 381 кВт-ч/т при получении порошка с удельной поверхностью $S_{уд}$ = 2200 – 2300 см^2/г .

Таким образом, показана возможность снижения удельных величин технологических энергозатрат в 2 – 2,5 раза с использованием данных акустического мониторинга и расчетных значений $Э_{изм}$ и $Э_{дисп}$.

На основе анализа [8] показателей акустической ($Э_{изм}$, $Э_{дисп}$) и технологической ($E_{уд}$, E_s) энергоемкости измельчения и диспергирования циркона в различных режимах работы классификатора промышленной мельницы на Вольногорском горно-металлургическом комбинате (ВГМК) показана возможность снижения удельных величин технологических энергозатрат в 2 – 2,5 раза с использованием данных акустического мониторинга и расчетных значений $Э_{изм}$ и $Э_{дисп}$.

Использование разработанной информационной технологии позволило определить оптимальные режимы работы промышленной струйной мельницы на ВГМК.

При крупности продукта 63 мкм (или 45 мкм) оптимальными являются следующие характеристики процесса измельчения:

производительность G = 960 – 1270 кг/ч (530 – 620 кг/г); удельная поверхность измельченного продукта $S_{уд}$ = 1500 – 2000 см^2/г (2400 – 2600 см^2/г); коэффициент оптимальности $K_{опт}$ = 60 – 130 В/с (10 – 60 В/с) и эффективности $K_{эфф}$ = 25 – 60 г/имп (23 – 46 г/имп; энергозатраты на измельчение $Э_{изм}$ = 480 – 580 имп/г (980 – 1300 имп/г) и диспергирование $Э_{дисп}$ = 0,2 – 0,3 имп/см^2 (0,4 – 0,5 имп/см^2).

Установленные связи характеристик акустических сигналов, режимных и технологических параметров процесса измельчения позволили разработать несколько направлений его оптимизации :

– непрерывный контроль максимальной амплитуды АС в ходе измельчения [9, 10];
– контроль процесса измельчения на основе установленных технико-акустических критериев и коэффициентов [11, 12];
– контроль качества измельченного продукта [13];
– непрерывный энергетический анализ акустических сигналов [14];
– система вейвлет-анализа акустических сигналов зоны измельчения [15];
– нейросетевой анализ режимов измельчения [16];
– анализ поверхности функции плотности распределения вероятности значений амплитуд сигналов характерных зон [17];
– моделирование процесса измельчения на основе цепей Маркова и моделей замкнутых циклов [18, 19].

Выводы.

1. Разработана информационная технология струйного измельчения, позволяющая при минимальном количестве начальных экспериментальных данных акустического мониторинга выполнить выбор оптимальных парамет-

ров процесса струйного измельчения для различных материалов и технологических режимов.

2. Определены основные технолого-акустические критерии работы измельчительной установки $K_{опт}$, $K_{эфф}$, $Э_{изм}$, $Э_{дисп}$, позволяющие оптимизировать процесс измельчения.

3. 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.

4. Разработанная ИТ опробована на лабораторных установках разных типоразмеров производительностью 0,2 и 20 кг/ч (ИТМ НАНУ и ГКАУ) и промышленной струйной мельнице производительностью 2 т/ч (ВГМК).

5. Прогнозирование хода процесса измельчения минералов с использованием моделирования и ИТ позволит снизить инерционность управления и осуществлять упреждающие управляющие воздействия для обеспечения эффективности производства тонкодисперсных порошков.

1. *Прядко Н. С.* Акустические исследования струйного измельчения / *Н. С Прядко*. – Germany, Saarbrucken : LAP LAMBERT Academic Publishing, OmniScriptum GmbH&Co.Kg., 2013. – 172 с.
2. *Прядко Н. С.* Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения / *Н. С. Прядко* // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 6. – С. 46 – 52.
3. *Скороходов В. Ф.* О роли информационных систем и математического моделирования в управлении процессами обогащения минерального сырья / *В. Ф. Скороходов, Р. М. Никитин, А. Г. Олейник* // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья : международное совещание «Плаксинские чтения – 12», 10 –12 сентября 2012 г, Петрозаводск : материалы. – 2012. – С. 354 – 355.
4. Мониторинг изменений технологических и режимных параметров в процессе струйного измельчения строительных материалов / *Н. С. Прядко, П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, Г. А. Стрельников, В. Н. Бовенко* // Применение дисперсных и ультрадисперсных порошковых систем в промышленных технологиях : научно-техническая конференция, июль 2008 г., Санкт-Петербург : сб. материалов. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 112 – 127.
5. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице / *Н. С. Прядко, П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко* // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – №4. – С. 117 – 121.
6. *Pryadko N. S.* Decrease of Power Consumption in Fine Grinding of Minerals / *N. S. Pryadko, P. I. Pilov, G. G. Pivnyak* // Mine Planning and Equipment Selection C Drebenstedt and R. Singhal (eds). – 2014. – P. 1069 –1079.
7. *Pryadko N. S.* Research of acoustic monitoring regularities in a jet grinding process / *N. S. Pryadko, P. I. Pilov, L. J. Gorobets* // Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 54 (2009), № 4. – P. 841 – 848.
8. Акустический метод оценки энергозатрат на струйное измельчение / *Н. С. Прядко, Л. Ж. Горобец, В. П. Краснопер, П. А. Бакум* // Збагачення корисних копалин. – 2014. – №56 (97). – С. 94 – 102.
9. Патент на винахід № 104427 Україна, МПК B 02C 25. Спосіб моніторингу струминного подрібнення і газоструминний млин / *Прядко Н. С., Пілов П. І., Горобец Л. Ж. ;* заявник і патентоволодар ВДНЗ «НГУ». – № a201016004, заявл. 10.07.2012; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 13.
10. Застосування акустоемісійного моніторінгу щодо струменевого подрібнення / *Н. С. Прядко, Л. Ж. Горобец, І. В. Верхоробина., Г. О. Стрельников* // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львов. – 2006. – № 40. – С. 69 – 74.
11. Оптимизация тонкого измельчения при подготовке минерального сырья к обогащению и переработке / *Н. С. Прядко, Л. Ж. Горобец, К. А. Левченко, Л. А. Цыбулько, А. М. Шевелева* // Современные технологии освоения минеральных ресурсов : сб. научн. тр. / под общ ред. *В. Е. Кислякова*. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – Вып.11. – С. 232 – 241.
12. *Прядко Н. С.* Акустический метод исследования процесса измельчения / *Н. С. Прядко, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко* // Обогащение руд. – 2013.– № 3. – С. 18 – 24.
13. Патент на винахід № 98182 Україна, МПК B 02C 25. Спосіб газоструминного подрібнення сипучого матеріалу / *Прядко Н. С.* ; заявник і патентоволодар ІТМ НАНУ і ДКАУ. – a 201008111 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 25.04.2012, Бюл. №8.

14. *Прядко Н. С.* Использование данных информационной системы акустического мониторинга струйного измельчения для управления процессом / *Н. С. Прядко, Т. М. Буланая* // Вісник ДНУЗТ. – 2012. – Вип. 42. – С. 129 – 133.
15. Application of wavelet transform in analysis of jet grinding process / *A. Mikhalyov, N. Pryadko, R. Suhomlin, A. Kotyra* // Elektronika. – Lublin. – 2013. – №8. – P. 20 – 22.
16. Информационная технология получения тонкодисперсных материалов струйным измельчением / *Н. С. Прядко, Т. М. Буланая, Л. Ж. Горобец, Ю. Г. Соболевская, Н. П. Сироткина* // Системные технологии : региональный межвузовский сборник научных трудов. – Днепропетровск. – 2010. – Вып. 3(58). – С. 40 – 46.
17. Патент на корисну модель № 73291 Україна, МПК B 02C 25. Спосіб моніторингу струминного подрібнення / *Прядко Н. С., Булана Т. М.* ; заявник і патентоволодар ІТМ НАНУ і ДКАУ. – u 2011 14725, заявл. 12.12.2011; опубл. 25.09.2012, Бюл. № 18.
18. *Прядко Н. С.* Моделирование процесса струйного измельчения на основе акустического мониторинга / *Н. С. Прядко* // Техническая механика. – 2012. – №3. – С.179 – 184.
19. *Пилов П. И.* Моделирование замкнутых циклов измельчения руд на основе баланса контрольного класса крупности / *П. И. Пилов, Н. С. Прядко* // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 6. – С. 75 – 80.

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

Получено 20.11.14,
в окончательном варианте 03.12.14