УДК 622.73

Н. С. ПРЯДКО, Г. А. СТРЕЛЬНИКОВ, Е. В. ТЕРНОВАЯ, А. М. ШЕВЕЛЕВА, Л. В. МУЗЫКА

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

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

Висока енергоємність процесу подрібнення сипучих матеріалів пояснює актуальність завдання підвищення ефективності газодинамічних процесів в установках струминного подрібнення. Мета роботи полягає в аналізі результатів досліджень з розробки нових підходів до оптимізації процесу сухого тонкого подрібнення і контролю якості його продуктів.

Встановлено закономірності і механізм формування гранулометричного складу продуктів подрібнення для досягнення необхідної дисперсності при мінімальному енергоспоживанні. Виявлено критичний рівень енергоємності тонкого подрібнення. Розроблено науковий підхід до зниження питомих енерговитрат в замкнутих циклах тонкого подрібнення, що базується на балансовій та імітаційній моделях.

Створено метод дослідження струминного подрібнення на основі акустичного моніторингу робочих зон млина. Встановлено зв'язки технологічних і акустичних параметрів, визначені закономірності акустичного випромінювання струминної установки. Обґрунтовано застосування акустичного контролю дисперсності сипучих матеріалів різних властивостей. Розроблено експериментальні установки для аналізу гранулометричного складу матеріалів в потоці. Встановлено залежність дисперсії характерних частот від маси частинок і розміру фракції в суміші, яка дозволяє безконтактно визначати та прогнозувати гранулометричний склад матеріалу в газовому потоці. Розроблено методику контролю якості подрібненого продукту, що апробована в промислових умовах.

Розроблено кілька напрямків оптимізації процесу подрібнення, метод оцінки і прогнозування енерговитрат. Система візуалізації та ідентифікації режимів струминного подрібнення, розроблена на основі інформаційних технологій і результатів акустичного моніторингу, дозволяє при мінімальній кількості первинних експериментальних даних виконати вибір оптимальних параметрів процесу струминного подрібнення. Необхідно продовжити розробку автоматизованої системи управління струминним подрібненням на основі аналізу акустичних сигналів процесу.

Высокая энергоемкость процесса измельчения сыпучих материалов объясняет актуальность задачи повышения эффективности процессов в установках струйного измельчения. Цель работы заключается в анализе результатов исследований по разработке новых подходов к оптимизации процесса сухого тонкого измельчения и контроля качества его продуктов.

Установлены закономерности и механизм формирования гранулометрического состава продуктов измельчения для достижения необходимой дисперсности при минимальном энергопотреблении. Выявлен критический уровень энергоемкости тонкого измельчения. Разработан научный подход к снижению удельных энергозатрат в замкнутых циклах тонкого измельчения, базирующийся на балансовой и имитационной моделях.

Создан метод исследования струйного измельчения на основе акустического мониторинга рабочих зон мельницы. Установлены связи технологических и акустических параметров, определены закономерности акустического излучения струйной установки. Обосновано применение акустического контроля дисперсности сыпучих материалов различных свойств. Разработаны экспериментальные установки для анализа гранулометрического состава материалов в потоке. Установлена зависимость дисперсии характерных частот от массы частиц и размера фракции в смеси, которая позволяет бесконтактно определять и прогнозировать гранулометрический состав материала в газовом потоке. Разработана методика контроля качества измельченного продукта, апробированная в промышленных условиях.

Разработаны несколько направлений оптимизации процесса струйного измельчения, метод оценки и прогнозирования энергозатрат. Система визуализации и идентификации режимов струйного измельчения, разработанная на основе информационных технологий и результатов акустического мониторинга, позволяет при минимальном количестве начальных экспериментальных данных выполнить выбор оптимальных параметров процесса струйного измельчения. Необходимо продолжить разработку автоматизированной системы управления струйным измельчением на основе анализа акустических сигналов процесса.

The high energy intensity of the bulk material grinding process explains the topicality of the problem of increasing the process efficiency in jet grinding plants. The aim of this paper is to analyze the results of investigations into the development of new approaches to the optimization of the dry fine grinding process and grinding product quality control.

Grinding product particle size distribution formation regularities and mechanism such that the required particle size is achieved with minimal energy consumption were established. A critical level of fine grinding energy intensity was found out. A scientific approach to reducing the specific power consumption in closed cycles of fine grinding was developed based on a balance and a simulation model.

A method was developed for jet grinding study based on acoustic monitoring of the grinding plant working

areas. The process parameters were related to the acoustic ones, and the regularities of acoustic radiation from a jet grinding plant were determined. The use of acoustic monitoring in the determination of the particle size of bulk materials of various properties was justified. Experimental plants were developed for the in-flow analysis of the material particle size distribution. The dependence of the characteristic frequency dispersion on the particle mass and the fraction size in the mixture was established, which allows the contactless determination and prediction of the material particle size distribution in a gas flow. A grinding product quality control technique was developed and tested in industrial conditions.

Several lines of jet grinding optimization and a power consumption evaluation and prediction method were developed. The jet grinding regime visualization and identification system developed on the basis of information technologies and acoustic monitoring results allows one to choose the optimum parameters of the jet grinding process with a minimum of starting experimental data. There is a need to continue the development of an automated system that would control the jet grinding process based on the analysis of its acoustic signals.

Ключевые слова: *акустический мониторинг, гранулометрический состав, контроль качества, струйное измельчение.*

Введение. Измельчение материалов – очень энергоемкий процесс. На обогатительных фабриках на измельчение руд тратится (45 – 65) % общего расхода энергии. Особенно много энергии необходимо для тонкого измельчения. В последние годы развитие промышленности требует производства продуктов тонкого (менее 20 мкм) и сверхтонкого (менее 7 мкм) измельчения. 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, строительных материалов, удобрений, медикаментов и т. д. Требование повышения дисперсности материалов приводит к необходимости совершенствования существующего и созданию нового оборудования и технологий для тонкого и сверхтонкого измельчения. Этот процесс сдерживается отсутствием теоретического обоснования выбора оптимальных режимов измельчения, методик и научных способов контроля дисперсности продукта, что не позволяет снизить энергоемкость процесса. Поэтому снижение энергопотребления процесса и повышение качества готового продукта при измельчении материалов является актуальной задачей.

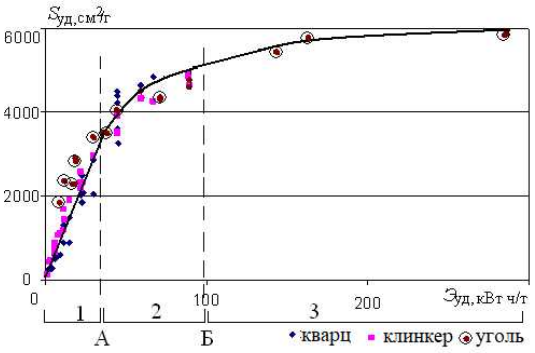
Состояние вопроса. Исследования по этому направлению велись в Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ) в соответствии с рабочими планами госбюджетных тем III-79-12, III-86-15, III-99-18 и были посвящены разработке теории и технологии газоструйного измельчения материалов на основе связей технологических и акустических параметров процесса.

Цель работы состоит в анализе результатов исследований по разработке новых подходов к оптимизации процесса сухого тонкого измельчения и контроля качества его продуктов

Материалы исследования. Исходя из анализа энергетических особенностей тонкого измельчения полезных ископаемых в барабанных и струйных мельницах, выявлен критический уровень энергоемкости тонкого измельчения, связанный с типом измельчения и размерами частиц (порядка (10 – 25) мкм) готового продукта [1, 2].

Многочисленные исследования закономерностей измельчения позволили выделить главную характеристику, которая связывает вновь образованную

удельную поверхность при измельчении с энергозатратами на этот процесс (рис. 1).



0 – А – область линейной связи;
А – Б – область накопления тонких частиц;
Б – критический порог

Рис. 1 – Зависимости удельной поверхности материалов $S_{уд}$ от удельного расхода энергии $Э_{уд}$ в мельницах

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

По мере того, как появляются тонкие частицы, энергии на разрушение таких частиц приходится затрачивать больше, и поэтому чувствительность упомянутой характеристики к увеличению энергопотребления мельницы снижается (участок 2 на рис. 1).

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.

Приближение к критическому уровню характеризуется значительным увеличением энергоемкости процесса измельчения (см. рис. 1, а), точка Б) и обозначает предельные возможности механического раскрытия полезных ископаемых и обогащения. Для исключения перехода величины энергоемкости через критическую величину необходимо осуществлять контроль процесса тонкого измельчения, например, с использованием математического моделирования и информационных технологий.

Прежде всего, разработан научный подход к снижению удельных энергозатрат в замкнутых циклах тонкого измельчения, который включает разработку балансовой модели и выбор оптимального режима классификации по крупности загрузки мельницы. Установлена величина удельных энергозатрат по вновь образованному классу как характерная константа мельницы при измельчении данной руды [3, 4]. Для обоснования технологических схем процессов измельчения и выбора типа мельниц доказана и экспериментально подтверждена независимость кинетики измельчения фракций сыпучих материалов в смеси, что позволяет прогнозировать изменение грансостава материала в ходе измельчения [5]. Этот факт создает основу дальнейших исследований дисперсности материалов и прогнозирования продуктов измельчения.

Создана имитационная модель замкнутого цикла измельчения, показавшая возможность повышения производительности мельницы при дискретной загрузке [6]. Разработанная динамическая модель кинетики изменения гранулометрического состава материала в зоне измельчения [7] позволяет определять длительность измельчения для получения заданного выхода контрольного класса и разработать систему управления гранулометрическим составом

и производительностью мельницы по величине коэффициента переизмельчения. На рис. 2 показана структура моделей тонкого измельчения и изменение производительности *G*, кг/с при разных типах загрузки материала (рис. 2, а)) и оптимизации процесса по коэффициенту переизмельчения *K* (см. рис. 2, б)). 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 (см. рис. 2, б)).

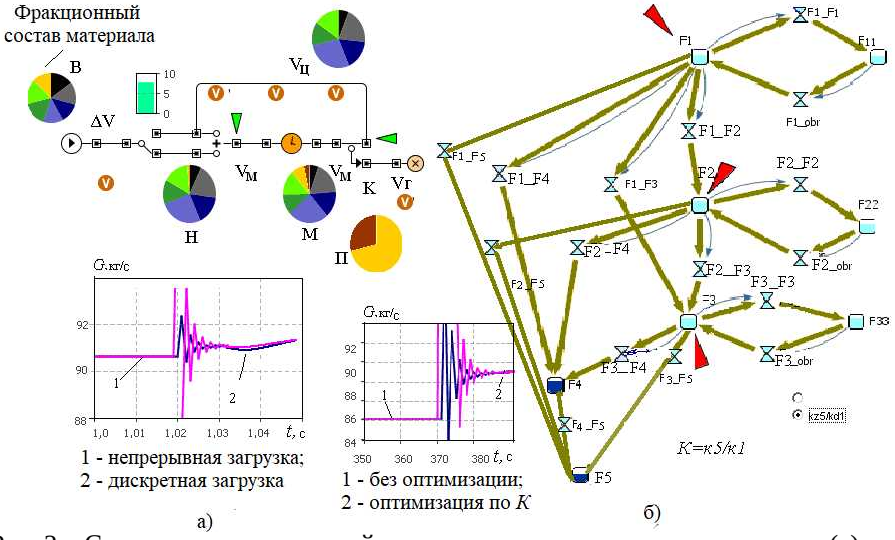


Рис. 2 – Структура имитационной модели замкнутого цикла измельчения (а) и динамической модели кинетики гранулометрического состава в зоне измельчения мельницы (б)

Результаты моделирования струйного измельчения проверены экспериментальными исследованиями струйного измельчения материалов различных физико-химических свойств с применением акустического мониторинга процесса. Испытания проводились на лабораторных экспериментальных стендах и промышленной мельнице Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) (см. рис. 3).

а) б) в)

Рис. 3 – Общий вид лабораторных измельчительных установок производительностью 20 кг/ч (а), 0,2 кг/ч (б) и промышленной мельницы ВГМК с волноводом (в)

В ИТМ НАНУ и ГКАУ совместно с Национальным техническим университетом «Днепровская политехника» разработан метод исследования струйного измельчения на основе акустического мониторинга рабочих зон мельницы [1, 8], создана аппаратная система с волноводами, пьезокерамическими датчиками, установленными внутри мельницы и в трубопроводе на выходе из классификатора, аналого-цифровым преобразователем, связанным с компьютером.

Исходя из физической сути процесса, выделены и изучены следующие режимы струйного измельчения: начало загрузки струй материалом – режим 1, оптимальный рабочий режим 2, режим разгрузки – режим 3 и режим 4 – перегрузки струй, за которым может наступить “завал” камеры. Установлены связи акустических параметров с режимами измельчения [9]. Изменение режима процесса 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 (см. рис. 4, а)). На рис. 4, б) показана активность акустических сигналов в зоне измельчения шамота на различных стадиях процесса измельчения. Режимы загрузки струйной мельницы материалом могут различаться: одноразовая, многоразовая (с дозагрузкой), непрерывная и периодическая. Исследования показали, что производительность измельчения зависит от своевременности и оптимальности загрузки струй материалом.

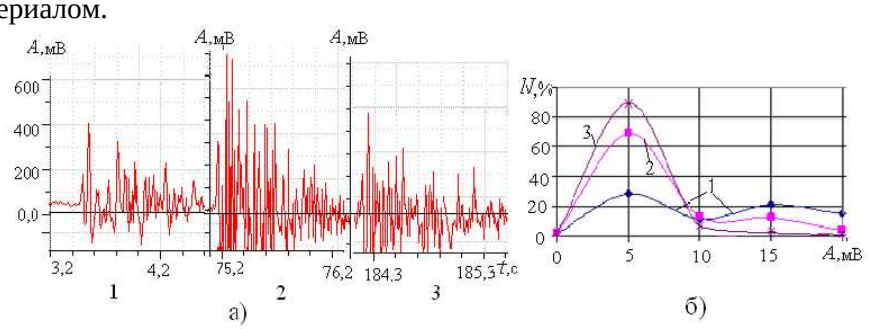


Рис. 4 – Кинетика амплитуд A (а) и активности акустических сигналов N (б) в зоне измельчения шамота на различных стадиях процесса: 1 – загрузка, 2 – рабочий режим, 3 – разгрузка

На основе теории разрушения и особенностей применения метода акустической эмиссии для противоточной струйной мельницы установлены связи технологических и акустических параметров [10, 11], определены закономерности акустического излучения струйной установки:

– амплитуда акустических сигналов и ее распределение по величине характеризуют степень загрузки струй твердой фазой;

– избыточная загрузка струй материалом сопровождается уменьшением амплитуды акустического излучения;

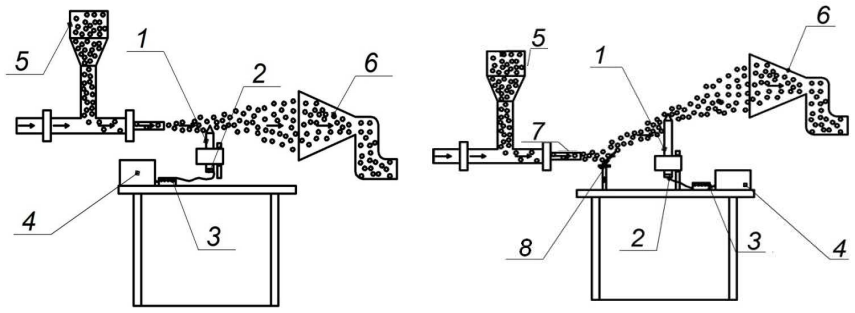
– повышение уровня акустической активности зоны помола на любой стадии является фактором роста числа ударов частиц, интенсификации измельчения и увеличения производительности мельницы;

– трехпараметрическая зависимость величины максимальной амплитуды сигналов A_{max} (мВ) от размера d (мкм) частиц измельченного продукта и плотности ° (г/см^3) материала в виде $A_{\max} = d \cdot 10^{0,4^\circ + 0,3}$, при этом коэф-

фициент корреляции $R = (0{,}8 - 0{,}9)$ позволяет прогнозировать ожидаемый размер частиц готового продукта.

Важное направление исследований связано с обоснованием акустического контроля дисперсности продуктов измельчения полезных ископаемых на основе связи технологических и акустических параметров процесса. Анализ существующих способов определения гранулометрического состава и дисперсности материалов показал ряд их недостатков (длительность проведения анализа, возможность контроля дисперсности только в потоке пульпы и т. д.). Экспериментально показана возможность исследования гранулометрического состава сыпучих материалов, транспортируемых в потоке энергоносителя [12 – 14].

Разработаны экспериментальные установки «Гранулометр-1» и «Гранулометр-2» для анализа гранулометрического состава материалов в потоке (см. рис. 5) и проведен регрессионный анализ для усовершенствования конструкции экспериментальной установки с учетом влияния геометрических параметров [15, 16]. Созданные установки при транспортировке двухфазных потоков используют принцип подачи материала в камеру струйной мельницы. Этот подход позволяет изучать связи акустических характеристик сигналов и крупности материала в рабочих зонах измельчительной установки, имитируя их в потоке. Для исследования гранулометрического состава материала, транспортируемого в потоке, анализировались не только амплитуды сигналов, но и частотный их спектр.



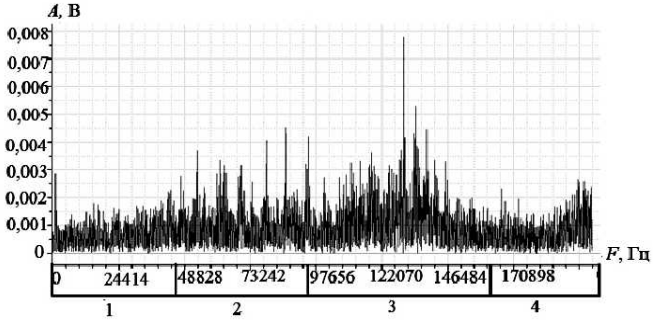
а) б)

1 – волновод; 2 – пьезокерамический датчик;
3 – аналого-цифровой преобразователь; 4 – компьютер;
5 – загрузочный бункер; 6 – бункер-уловитель материала,
7 – разгонная трубка, 8 – пластина

Рис. 5 – Схема установок для оценки дисперсности материалов в газовом потоке «Гранулометр -1» (а) и «Гранулометр -2» (б)

Анализ полученных записей акустических сигналов и их характеристик позволил определить характерные частоты для узких фракций различных материалов [14, 17]: для фракции 0,2 мм частота составляет 69 кГц, для 0,315 мм – 60 кГц, а для 0,4 мм – 78 кГц. В ходе проведения экспериментальных исследований были получены записи акустических сигналов, далее на основе метода Фурье проводился анализ амплитуд и спектров частот сигналов. Исследования показали, что полученный спектр частот по свойствам можно условно разделить на 4 участка: первый участок – сигналы с частотами (0 – 40) кГц; второй участок имеет отдельные всплески амплитуд при частотах (40 – 90) кГц; третий участок имеет широкий диапазон частот (90 – 160) кГц и четвертый участок – сигналы с частотами выше 160 кГц (см. рис. 6). Установлено, что сигналы с частотами, отнесенными ко второму интервалу, несут в себе информацию относительно размера частиц материала и

являются характерными для частиц конкретного класса крупности. Поэтому в дальнейшем исследовались сигналы с частотами из диапазона (40 – 90) кГц. Для этих сигналов проведено исследование дисперсии характерных частот акустических сигналов для узких классов крупности.



A – амплитуда акустических сигналов, В;
F – частота акустических сигналов, Гц

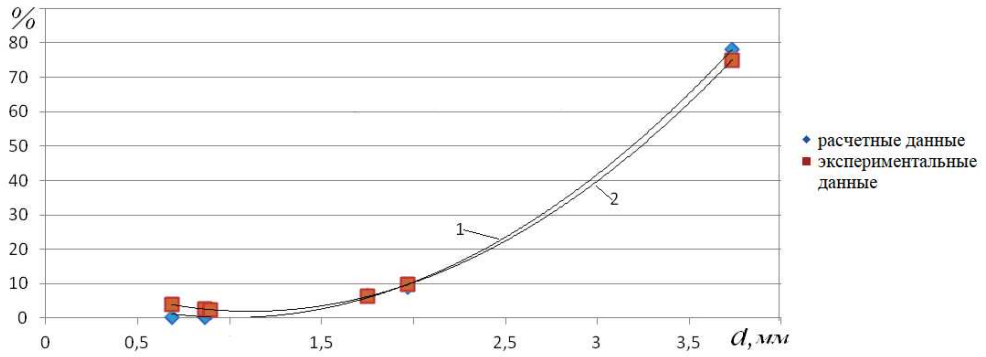
Рис. 6 – Амплитудно-частотный спектр акустических сигналов, записанных при транспортировании шамота крупностью менее 2,5 мм

В результате экспериментальных исследований установлена зависимость дисперсии характерных частот от массы частиц и размера фракции в смеси, которая позволяет бесконтактно определять гранулометрический состав материала в газовом потоке.

На этой основе проведено прогнозирование гранулометрического состава продуктов шарового измельчения. Экспериментальные исследования проводились на продуктах, полученных во второй и третьей стадии измельчения магнетитовых кварцитов в шаровых мельницах Частного акционерного общества «Северный горно-обогатительный комбинат» [17].

На первом этапе уточняется зависимость характеристик акустических сигналов от вычисленного гранулометрического состава промпродуктов второй стадии измельчения. С учетом этой зависимости на втором этапе по результатам предварительного анализа сигналов процесса транспортировки в потоке концентрата магнетитового кварцита после третьей стадии измельчения прогнозируется его гранулометрический состав.

На рисунке 7 представлены кривые расчетных и экспериментально определенных выходов классов гранулометрического состава концентрата магнетитового кварцита после третьей стадии измельчения в шаровой мельнице.



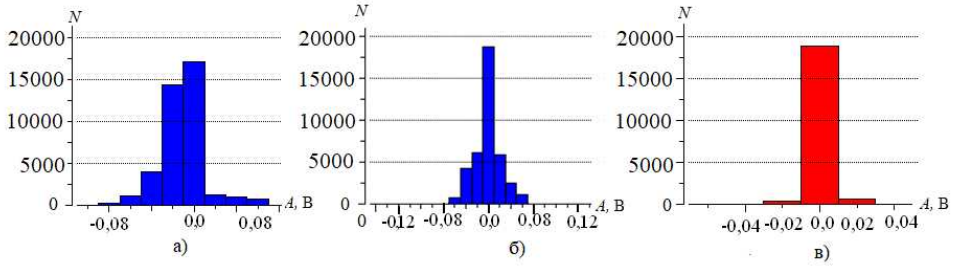
d – средний размер частиц материала, мм

Рис. 7 – Сравнение экспериментальных (1) и расчетных (2) значений содержания узких фракций магнетитового кварцита в смеси концентрата

Исследования показали хорошее совпадение расчетных значений содержания узких фракций в концентрате с экспериментальными.

Получен модифицированный вид интегро-дифференциального уравнения кинетики тонкого измельчения руд [18] на основе связи акустических сигналов с размером частиц материала, что позволяет на основе предварительных данных определить состав исследуемой фракции материала в любой момент измельчения и, тем самым, прогнозировать качество продукта измельчения.

Проведенное исследование стандартного отклонения огибающей спектральной плотности мощности акустических сигналов зоны транспортировки различных фракций готового продукта стало основой методики дополнительного анализа характеристик акустических сигналов при транспортировке готового продукта измельчения для контроля его качества [19]. Показано, что с помощью сравнения спектральной плотности мощности эталонных и полученных в процессе измельчения сигналов можно, контролируя качество готового продукта измельчения, своевременно выявить наличие материала недопустимой крупности и изменить технологические параметры процесса измельчения. Разработана методика контроля качества измельченного продукта, которая включает визуальное наблюдение акустических сигналов оператором и дополнительный комплекс анализа акустических сигналов для уточнения результатов мониторинга (см. рис. 8).



N – активность акустических сигналов

Рис. 8 – Гистограмма анализа качества готового продукта при остатках на сите: а) 9,7 %; б) 4 %; в) 0,05 %

В промышленных условиях при анализе результатов измельчения допускается наличие (0,5 – 1,5) % в готовом продукте частиц класса крупнее контрольного. Применение разработанной методики контроля качества готового продукта измельчения ускоряет процесс определения крупности готового продукта за счет акустического мониторинга с 30 мин до 1 мин. Тем самым эта разработка обеспечивает повышение качества готового продукта и экономию электроэнергии при исключении повторной переработки продукта.

Качество продуктов измельчения определяется не только его дисперсностью, но и «чистотой», т. е. отсутствием примесей. Примеси появляются в результате износа металлических элементов измельчителя. Чтобы исключить это негативное явление, делают специальные износостойкие покрытия камеры измельчения и разгонных трубок эжектора. Футеровка каналов является самым простым и относительно недорогим способом защиты, однако обеспечивает лишь кратковременную защиту и при наличии крупных включений дисперсной фазы является мало эффективной. Конструкция кольцевого эжектора более эффективна в качестве средства защиты от износа стенок канала, однако она довольно сложна в расчете и проектировании. Наиболее ра-

циональным решением, при котором износ элементов конструкции будет минимальным, является создание защитного потока по периферии разгонного канала мельницы.

В ИТМ НАНУ и ГКАУ предложен газодинамический способ защиты разгонных трубок. Способ подачи энергоносителя и модернизированный узел эжектора запатентованы в Украине и проводятся исследования по усовершенствованию его работы. Проведены экспериментальные исследования по визуализации течений в разгонном канале, в результате которых установлены основные параметры, которые влияют на эффективность процесса. Разработана модель на основе классической схемы эжектора, содержащая канал подвода дополнительного потока газа и позволяющая предотвратить контакт стенок эжекторного устройства с эжектируемым материалом за счет создания защитного газового слоя, не снижая при этом скорости движения смешанного потока и не создавая явления «запирания».

Необходимо продолжить исследования режимов работы эжектора при наличии дополнительного периферийного потока для создания эффективной защиты стенок разгонного канала от воздействия твердых частиц материала.

Установленные связи характеристик акустических сигналов, режимных и технологических параметров процесса измельчения позволили разработать несколько направлений его оптимизации [20]:

– непрерывный контроль максимальной амплитуды АС в ходе измельчения [9, 10];

– непрерывный энергетический анализ акустических сигналов [8];

– система вейвлет-анализа акустических сигналов зоны измельчения [21];

– анализ поверхности функции плотности распределения вероятности значений амплитуд сигналов характерных зон [17];

– моделирование процесса измельчения на основе цепей Маркова и моделей замкнутых циклов [1, 3, 22];

– контроль качества измельченного продукта [23];

– контроль процесса измельчения на основе установленных технико-акустических критериев и коэффициентов [24 – 26].

Система визуализации и идентификации режимов струйного измельчения [1, 10], разработанная на основе информационных технологий и результатов акустического мониторинга, позволяет при минимальном количестве начальных экспериментальных данных выполнить выбор оптимальных параметров процесса струйного измельчения для разных материалов и технологических режимов. Например, на рис. 9 показан результат анализа режимов струйного измельчения шлака в лабораторной мельнице на основе исследования энергии сигналов зоны измельчения. На основе анализа акустических сигналов определены также основные комплексные технолого-акустические критерии работы измельчительной установки [26]: критерий оптимальности, эффективности измельчения и диспергирования, коэффициент циркуляции, позволяющие в значительной мере контролировать и оптимизировать измельчение в ходе его процесса.

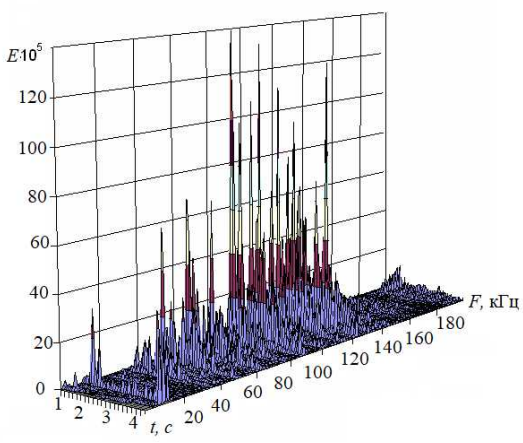
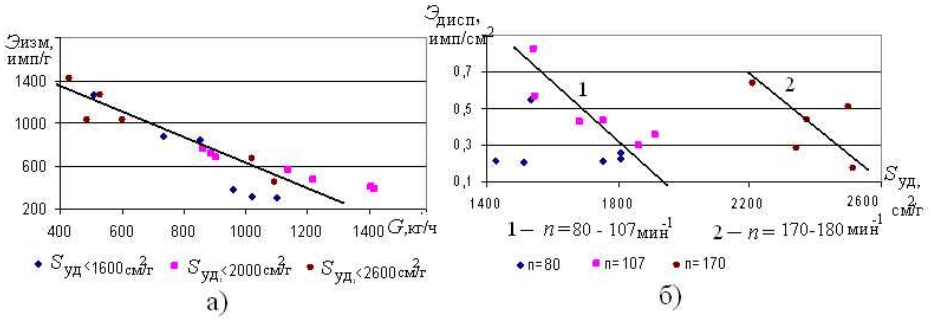


Рис. 9 – Распределение энергии акустических сигналов E по частотным полосам в ходе измельчения: начало загрузки материала $-0 \le t \le 1$, мин; рабочий режим $1 \le t \le 3{,}5$, мин; разгрузка $3{,}5 \le t \le 4$,мин

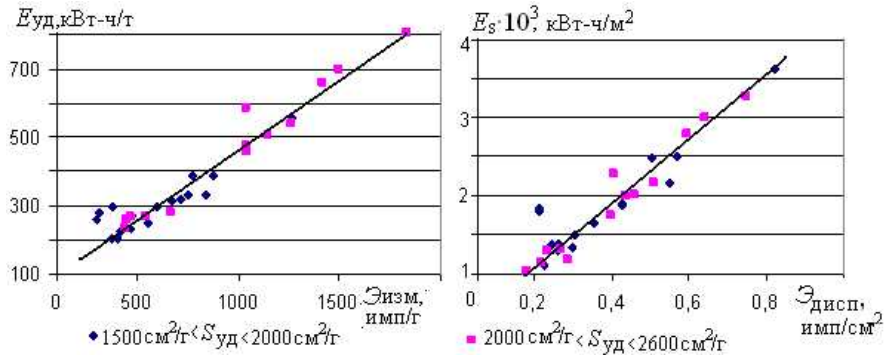
Разработанный метод оценки и прогнозирования энергозатрат при струйном измельчении базируется на установленных связях технологических, акустических и энергетических показателей энергоемкости измельчения $Э_{изм}$ (имп/г) и диспергирования $Э_{дисп}$ (имп/см^2) при разной дисперсности готового продукта, которая определяется удельной поверхностью S, см^2/г и получается при разных режимах классификации, т. е. при разных оборотах n ротора классификатора. На рис. 10 иллюстрируются тенденции снижения удельных акустических энергозатрат с повышением производительности мельницы.



n – число оборотов классификатора, мин$^{-1}$;
$S_{уд}$ – удельная поверхность, см^2/г

Рис. 10 – Зависимости акустической энергоемкости измельчения $Э_{изм}$ (а) от производительности мельницы G и акустической энергоемкости диспергирования $Э_{дисп}$ (б) от удельной поверхности продукта $S_{уд}$

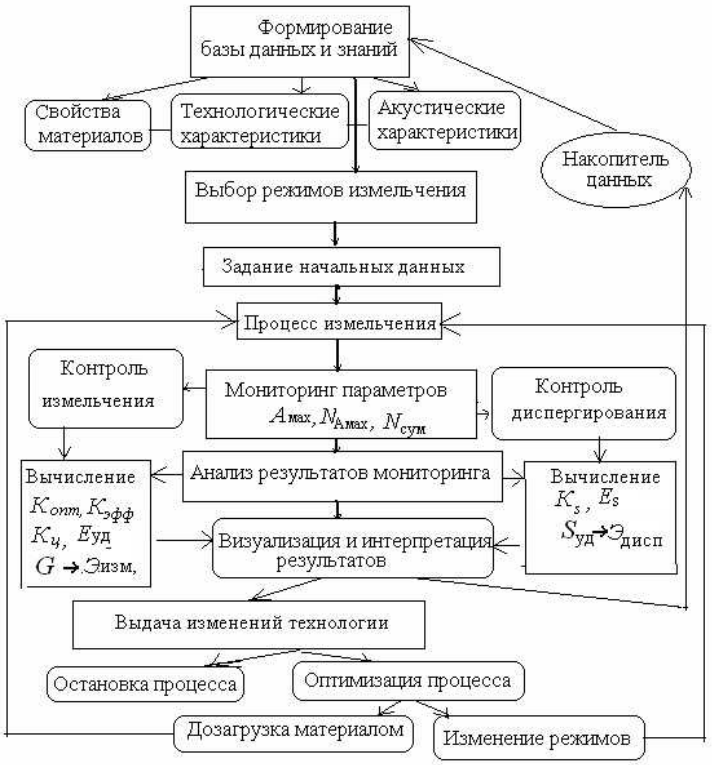
Экспериментально установлен вид уравнений для технологического энергетического показателя измельчения и диспергирования ($E_{уд}$, E_s), базирующийся на связях удельных технологических и акустических показателей энергозатрат и связанный с технологической задачей: достижением максимальной производительности мельницы или соблюдением максимальной дисперсности продукта. Линейные связи удельных технологических и акустических показателей энергозатрат прослеживаются на рис. 11.



а) б)

Рис. 11 – Связи удельных технологических и акустических показателей энергозатрат на измельчение и диспергирование

Вид предпочтительного энергетического показателя ($E_{уд}$, E_s) связан с технологической задачей: достижением максимальной производительности мельницы (вариант рис. 11, а)) или поддержанием максимальной дисперсности продукта (вариант рис. 11, б)).



A_{max} – максимальная амплитуда акустического сигнала, мВ; N_{Amax} – активность акустического излучения, имп / с; $N_{сум}$ – суммарная активность акустического излучения, имп / с; $K_{эфф}$ – коэффициент эффективности; $K_{опт}$ – критерий оптимальности; $K_ц$ – коэффициент циркуляции; K_S – критерий эффективности диспергирования

Рис. 12 – Алгоритм акустического мониторинга процесса измельчения

На рис. 12 показан общий алгоритм акустического мониторинга, по результатам которого проводится оптимизация струйного измельчения.

Результаты теоретических исследований реализованы и подтверждены при измельчении в условиях лабораторных и промышленной струйных мельниц. Использование акустической оптимизации промышленной мельницы ВГМК показало возможность увеличения ее производительности до 50 %, что определило расчетный годовой экономический эффект (185 – 507) тыс. грн. в зависимости от крупности цирконового концентрата.

Изучение связей технологических и акустических параметров позволило начать работы по созданию автоматизированной системы управления работой струйной мельницы. Оптимальные параметры процесса работы мельницы можно реализовать путем контроля акустических параметров зоны измельчения и управления загрузкой материала на основе поиска оптимальной насыщенности струй твердой фазой [27].

Выводы. Теоретические и экспериментальные исследования тонкого измельчения позволили установить закономерности и механизм формирования гранулометрического состава продуктов измельчения для достижения необходимой дисперсности при минимальном энергопотреблении.

На основе этих закономерностей разработаны модели тонкого измельчения и предложен новый подход к анализу и оптимизации процесса на основе связей технологических параметров и акустических сигналов зоны струйного измельчения, а также использования информационных технологий для идентификации процесса. Все это дало возможность обосновать и разработать методы оптимизации процесса, в результате чего достигнуты требуемые технологические показатели при снижении энергопотребления и соблюдении контрольной дисперсности.

Оптимальные параметры процесса работы мельницы реализованы путем контроля акустических параметров зоны измельчения и управления загрузкой материала на основе поиска оптимальной насыщенности струй твердой фазой.

Система визуализации и идентификации режимов струйного измельчения, разработанная на основе результатов акустического мониторинга и использующая информационные технологии, позволяет при минимальном количестве начальных экспериментальных данных выполнить выбор оптимальных параметров процесса струйного измельчения для разных материалов и технологических режимов.

Обосновано применение акустического мониторинга для контроля дисперсности материалов, транспортируемых в потоке энергоносителя. На основе анализа характеристик акустических сигналов разработана методика контроля качества продуктов струйного измельчения, предложен способ прогнозирования дисперсности продуктов измельчения по предварительным результатам акустического мониторинга.

Необходимо продолжить разработку автоматизированной системы управления струйным измельчением на основе анализа акустических сигналов процесса.

1. *Прядко Н. С.* Развитие теории тонкого измельчения полезных ископаемых: автореферат дисс. д-ра техн. наук: 05.15.08. НГУ. Днепропетровск. 2015. 36 с.
2. *Pryadko N.* Application of information technology for decrease of fine grinding power consumption. Power Engineering and Information Technologies in Technical Objects Control, Annual publication. Leiden, The Netherland: CRC Press/Balkema. 2016. P. 67–73.

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. *Пилов П. И., Прядко Н. С.* Моделирование замкнутых циклов измельчения руд на основе баланса контрольного класса крупности. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. № 6. С. 75–80.
5. *Пилов П. И., Прядко Н. С., Терновая Е. В.* О кинетике измельчения отдельных фракций в смеси. Збагачення корисних копалин. 2014. №57 (98). С. 101–106.
6. *Саксонов Г. М., Прядко Н. С., Терновая Е. В.* Имитационная модель замкнутого цикла измельчения минерального сырья. Системные технологии: региональный межвузовский сборник научных трудов. 2014. № 3 (92). С. 19–25.
7. *Саксонов Г. М., Прядко Н. С., Терновая Е. В.* Имитационная модель кинетики тонкого измельчения материалов. Вестник НТУ «ХПИ». 2014. № 53 (1095). С. 89–97.
8. *Прядко Н. С.* Акустические исследования струйного измельчения. LAP LAMBERT Academic Publishing.OmniScriptum GmbH&Co.Kg. Saarbrucken Germany. 2013. 172 p.
9. *Горобец Л. Ж., Прядко Н. С., Бовенко В. Н.* Акустический метод исследования процесса измельчения. Обогащение руд. 2013. № 3. С. 18–24.
10. *Прядко Н. С.* Информационные технологии для оптимизации тонкого измельчения материалов. Системные технологии моделирования сложных систем. 2016. С. 427–462.
11. *Pryadko N.* Optimization of fine grinding on the acoustic monitoring basis. Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems. Taylor & Francis Group, London. 2015. P. 99–108.
12. Спосіб визначення гранулометричного складу сипучого матеріалу в потоці в процесі подрібнення. Патент на винахід № 114442 Україна, МПК B 02 C 25/00, B 02 C 19/06, G 01 N 29/00 / *Пілов П. І., Горобець Л. Ж., Прядко Н. С., Тернова К. В.*; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ. № a 2015 07099, заявл. 16.07.201. опубл. 12.06.2017. Бюл. № 11. 6 с.
13. *Терновая Е. В.* Анализ частот сигналов при транспортировании и измельчении сыпучих материалов в потоке. Збагачення корисних копалин. 2016. № 63 (104). С. 59–65.
14. *Прядко Н. С., Терновая Е. В.* Установление возможности оценки фракционного состава сыпучих материалов по частотным характеристикам. Збагачення корисних копалин. 2017. № 67 (108). С. 161–168.
15. *Прядко Н. С., Терновая Е. В.* Экспериментальные исследования характеристик акустических сигналов при транспортировании материалов в установках «Гранулометр». Збагачення корисних копалин. 2016. № 64 (105). С. 111–118.
16. *Терновая Е. В.* Разработка модели установки для определения дисперсности материала в потоке энергоносителя на основе регрессионного анализа. Техническая механика. 2017. № 1. С. 100–106.
17. *Прядко Н. С., Терновая Е. В.* Прогноз гранулометрического состава продуктов измельчения при обогащении магнетитовых кварцитов на основе акустического мониторинга. Збагачення корисних копалин. 2017. № 68 (109). С. 32–36.
18. *Прядко Н. С., Терновая Е. В.* Интегро-дифференциальное уравнение кинетики тонкого измельчения. Техническая механика. 2016. № 4. С. 104–112.
19. *Сухомлин Р. О., Михальов О. І., Прядко Н. С., Тернова К. В.* Дослідження можливості використання декомпозиції SSA для оцінювання гранулометричного складу матеріалу. ВІСНИК ХНТУ. 2017. Т. 1, №3 (62). С. 228–232.
20. *Прядко Н. С., Коваленко Н. Д., Стрельников Г. А.* Развитие теории и технологии тонкого измельчения. Техническая механика. 2015. №4. С. 72–84.
21. *Mikhalyov A., Pryadko N., Suhomlin R., Kotyra A*. Application of wavelet transform in analysis of jet grinding process. Elektronika. 2013. №8. P. 20–22.
22. *Прядко Н. С.* Моделирование процесса струйного измельчения на основе акустического мониторинга. Техническая механика. 2012. №3. С.179–184.
23. *Pryadko N. S.* Improving of the jet grinding efficiency based on acoustic monitoring. Міжнародна конференція «Інноваційні науці та освіті. Європейський досвіт»: Матеріали у 2-х томах. Том 1. 2017. С. 302–307.
24. *Bevzenko B., Pilov P., Gorobets L., Pryadko N.* Acoustic monitoring for optimization of grinding equipment. MPES-15, Smart Innovation in Mining.SAIMM. P. 1155–1160.
25. *Горобец Л. Ж., Прядко Н. С.* Акустические параметры оптимизации процесса струйного измельчения. Зб. наукових праць ПолНТУ. 2012. Вип. 2 (32). С. 128–136.
26. *Горобец Л. Ж., Прядко Н. С., Краснопер В. П., Бакум П. А.* Акустический метод оценки энергозатрат на струйное измельчение. Збагачення корисних копалин. 2014. №56 (97). С. 94–102.
27. *Музыка Л. В., Прядко Н. С.* Методика автоматического управления струйным измельчением на основе моделей объекта и системы управления. Системные технологии. 2017. № 2 (109). С. 51–58.

Получено 12.07.2018,
в окончательном варианте 27.09.2018