

**Впровадження технічних та природоохоронних рішень зі зниження викидів оксидів вуглецю та пилу в атмосферне повітря на СВД ТОВ фірма „ЕКІНА” / *О.Л. ПРОЦЕНКО, Т.Ф. ЖУКОВСЬКИЙ, С.Л. БОРИСЕНКО* // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 27 (1070). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 64 – 71. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0821.**

В статье приведены результаты инструментальных измерений на источниках выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух СПУ ООО фирмы "ЭКИНА". Разработан комплекс технологических и природоохранных мероприятий, направленных на повышение экологической безопасности производства ферросилиция.

**Ключевые слова:** производство ферросилиция, источники выбросов, загрязняющие вещества, атмосферный воздух, мероприятия, экологическая безопасность.

**Implementation of technical and environmental solutions to reduce emissions of oxides of carbon and dust in the air on the LLC "EKINA" / *O.L. PROTSENKO, T.F. SHUKOVSKIJ, S.L. BORYSENKO* // Visnyk NTU «KhPI». – 2014. – № 64 (1070). – (Series: Khimiya, khimichna tekhnolohiya ta ecolohiya). – P. 64 – 71. – Bibliogr.: 5 names. – ISSN 2079-0821.**

The article contains the results of instrumental measuring on sources of polluting substances emission to the atmosphere by LLC "EKINA". Was developed the set of technical and environmental activities, which are directed to increase the ecological safety of ferrosilicon production.

**Keywords:** ferrosilicon production, sources of emission, pollution substances, atmosphere, activities, ecological safety.

**Н.С. ПРЯДКО**, канд. техн. наук, ИТМ НАН и НКА Украины,  
**Л.Ж. ГОРОБЕЦ**, д-р техн. наук, ГВУЗ «НГУ»,  
**К.А. ЛЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук,  
**И.В. ВЕРХОРОБИНА**, инж., ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск

## **ПРИНЦИПЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

Обоснованы принципы оптимизации процесса тонкого измельчения, подтвержденные результатами акустического мониторинга показателей работы лабораторной и промышленной струйной мельниц. Установлены критерии и предложен алгоритм контроля эффективности процесса и качества тонкодисперсного продукта.

**Ключевые слова:** тонкое измельчение, оптимизация, мониторинг, акустические параметры, критерии.

© Н.С. Прядко, Л.Ж. Горобец, К.А. Левченко, И.В. Верхоробина, 2014

**Постановка проблемы.** В технологии обработки полезных ископаемых процессы тонкого измельчения (диспергирования) являются самыми энергоемкими. В связи с этим актуальной является проблема установления оптимальных условий измельчения. Последние открытия в физике прочности и разрушения дали толчок исследованиям физического механизма измельчения. Формирование нового подхода к исследованию эффектов диспергирования в процессах разрушения и измельчения основано на использовании принципа подобия энергетических спектров при разрушении лабораторных образцов и горного массива [1], закономерностей разрывных (релаксационных) автоколебаний конденсированного вещества в теории предразрушения [2], вывода об определяющей роли накопления повреждений [3] в моделях объемно-деформированного состояния горных пород.

Согласно исследованиям [4], метод акустической эмиссии (АЭ) дает информацию обо всех стадиях кинетического процесса разрушения (трещинообразование, диспергирование, дробление) и ожидаемых эффектах измельчения. Ведущими акустическими характеристиками в прогнозе эффектов измельчения являются удельное акустическое излучение, кинетика амплитуд и активности АЭ на стадии запредельного деформирования. В [5] показано, что существует корреляционная связь амплитуды акустических сигналов (АС) с размером разрушения при сжатии лабораторных образцов горных пород и ударах частиц в процессе струйного измельчения. Из этого следует, что изменение размеров частиц в процессе измельчения обусловит трансформацию амплитудных распределений АС.

Проверка теоретических выводов о применимости акустического метода для мониторинга процесса измельчения проводилась на примере струйной мельницы, механизм которой обеспечивает технологические требования получения тонкодисперсных активированных порошков минерального сырья.

В работах [5 – 7] апробирован акустический мониторинг работы струйной мельницы для контроля загрузки струй материалом и крупности измельчаемых частиц. Режим измельчения оценивался по количеству измельченного продукта, расчетной величине производительности мельницы и степени дисперсности продукта. Испытания показали, что производительность мельницы отклоняется от максимального уровня в случаях, как перегрузки, так и недогрузки струй. Измерение уровня акустической активности зоны помола проводилось с помощью датчика, соединенного с латунным волноводом, установленным внутри помольной камеры мельницы. На основе эксперимен-

тальных результатов были установлены зависимости амплитуд АС от размеров измельчаемых частиц, а также акустической активности  $\dot{N}$  (скорости счета АС) от режима загрузки струй.

**Цель данной работы** – на основе анализа и обобщения опытных данных акустического мониторинга процесса струйного измельчения сформулировать основные принципы оптимизации этой технологии при получении различного вида тонкодисперсных порошков.

**Содержание исследований.** Экспериментальные исследования проведены в лабораторной струйной мельнице УСИ-20 производительностью до 20 кг/ч и промышленной УСИ-2000 – до 2000 кг/ч. Производительность лабораторной мельницы на кварцевом песке составила  $G = 3 - 5$  кг/ч при давлении сжатого воздуха  $P = 0,3$  МПа и частоте вращения ротора классификатора  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>. Производительность промышленной мельницы на цирконовом концентрате составляла 0,6 – 1,1 т/ч при  $P = 0,5 - 0,6$  МПа,  $n = 84 - 180$  мин<sup>-1</sup>.

Особенности методики анализа акустических сигналов состояли в следующем. Рассматривались АС в зоне измельчения при частоте регистрации 400 кГц. За выбранный интервал времени (порядка 1 – 100 мс) вычислялись значения максимальной  $A_{max}$  и условно средней  $A_{cp}$  амплитуды, суммарной  $\dot{N}_{\Sigma}$  и частной  $\dot{N}_{Amax}$  активности (имп/с) акустического излучения зоны помола.

При этом в определении  $A_{max}$  учитывались сигналы с долевым участием более 1 % (более 10 АС); величина  $A_{cp}$  соответствовала 50 %-ной активности. При оценке исключались сигналы «шума» струи ( $N_x$  с амплитудой менее 1 – 2 мВ), так чтобы величину акустической активности  $\dot{N} = (N_{\Sigma} - N_x) / \tau$  правомерно считать пропорциональной числу соударений частиц с волноводом.

Записи акустических сигналов анализировались в разные моменты процесса измельчения, характерные для различных состояний струй: начало подачи материала в струю, период интенсивного измельчения (рабочий режим не менее десятков секунд) и заключительную стадию разгрузки струй, предваряющую режим «фонового шума» струи.

Исследования показали, что акустические параметры  $\dot{N}_{max}, \dot{N}_{\Sigma}, A_{max}$  зоны помола значительно изменяются под влиянием степени загрузки струй материалом (перегрузка, недогрузка, рабочий режим), частоты вращения ротора классификатора и давления энергоносителя. В этой связи в число изу-

чаемых технологических параметров внесено начальное давление сжатого воздуха (перед истечением из сопла), частота вращения ротора классификатора, степень загрузки струй материалом.

Обработка результатов проведенного исследования позволила сравнить кинетику акустической активности  $\dot{N}$  и амплитуд  $A_{max}$  максимальных значений акустических сигналов в рабочем режиме измельчения, а также амплитудные распределения акустических сигналов при различных значениях давления энергоносителя в рабочем режиме и на стадии разгрузки струй в зависимости от режима классификации.

Связь амплитуды  $A_{max}$  с показателем дисперсности измельченного продукта установлена в условиях работы мельницы УСИ-20 на различных материалах: шамот, шлак, известняк, уголь, крупность – менее  $2 \div 3$  мм.

Приведем результаты оценки дисперсности по величине удельной поверхности  $S_{уд}$  ( $m^2/g$ ) на приборе Т-3 Товарова: шамот –  $0,17 \div 0,28$ ; известняк –  $0,3 \div 0,68$ ; газовый уголь –  $0,97 - 1,88$ ; бурый уголь –  $1,11 \div 1,32$ , циркон –  $0,55 \div 0,59$ .

Сделан вывод о том, что установление максимальных значений  $A_{max}$  амплитуд АС в начале рабочего режима измельчения (первые секунды) и на стадии разгрузки струй позволяет осуществлять контроль качества измельченного продукта (размеров частиц и удельной поверхности [8]).

В процессе акустического мониторинга показатели диспергирования оценивали на основе доли малоамплитудных (менее 20 – 40 мВ) АС в общей величине суммарного счета. Исходя из экспериментальных данных, эффект трансформации кинетической энергии ускоренных струями частиц в акустическую энергию при разрушении частиц ударами прямо пропорционален значениям  $A_{max}$  максимальных амплитуд и частоте появления АС в зоне помола, т.е. соответствующей акустической активности  $\dot{N}$  ( $c^{-1}$ ).

В согласии с полученными результатами предлагается для оценки оптимальности работы мельницы (с максимальной производительностью) использовать критерий  $K_{opt}$  (В/с) интенсивности акустического излучения зоны помола. Его величину рассчитываем как произведение максимальной амплитуды  $A_{max}$  (В) на общую (суммарную)  $\dot{N}_{\Sigma}$  акустическую активность ( $c^{-1}$ ) зоны помола  $K_{opt} = A_{max} \cdot \dot{N}_{\Sigma}$  (В/с). Обработка экспериментальных данных показала широкий диапазон варьирования критерия  $K_{opt}$  в различных режимах измельчения, отличающихся производительностью струйной мельницы.

Анализ влияния технологических параметров на акустические характеристики зоны помола показал возможность оценки степени приближения процесса к оптимальным условиям по величине показателя  $K_{эфф}$  (г/имп) эффективности измельчения, определяемого как отношение производительности мельницы  $G$  к суммарной (представительной для рабочего режима) акустической активности зоны помола. При этом циркулирующую нагрузку в системе помола можно оценить относительным акустическим коэффициентом  $K_u = N/N_{загр}$ , где  $N$ ,  $N_{загр}$  – соответственно текущая и начальная (в момент загрузки материала) акустическая активность. Согласно опытным данным в рабочем режиме измельчения с уменьшением  $K_u$  растет величина  $K_{эфф}$ .

На основе изучения взаимосвязей исследуемых параметров с показателями измельчения для поиска оптимальных условий тонкого измельчения (диспергирования) предложены следующие акустические критерии:

- $K_{эфф}$  (г/имп) эффективности измельчения:  $K_{эфф} = G / \dot{N}_\Sigma$  ( $G$ , г/с,  $\dot{N}_\Sigma$ , имп/с);
- $K_S$  (см<sup>2</sup>/имп) эффективности диспергирования:  $K_S = G \cdot S_{y\partial} / \dot{N}_\Sigma$ ;

$$K_S = K_{эфф} S_{уд}; (S_{уд}, \text{см}^2/\text{г});$$

- $\mathcal{E}_N^{изм}$  (имп/г) энергоемкости измельчения – величина, обратная  $K_{эфф}$ ;
- $\mathcal{E}_N^{дисп}$  (имп/см<sup>2</sup>) энергоемкости диспергирования – величина, обратная  $K_S$ .

На рис. 1 сопоставлены значения критериев  $K_{эфф}$  и  $K_{онт}$  в условиях, обеспечивающих оптимальные показатели, и в моменты возможных технологических отклонений от оптимума: недогрузки или перегрузки струй, превышения массы циркулирующей нагрузки, уменьшения давления энергоносителя, изменения частоты вращения классификатора, нарушений герметичности пневмосистемы мельницы и т.д.

Из графиков видно, что в случаях технологических отклонений процесса от нормы величина акустических критериев оптимизации процессе измельчения уменьшается, а показателей энергоемкости  $\mathcal{E}_N^{изм}$  возрастает от 650 – 820 имп/г до 920 – 1900 имп/г и  $\mathcal{E}_N^{дисп}$  от 0,3 – 0,4 имп/см<sup>2</sup> до 0,5 – 1,1 имп/см<sup>2</sup>. Сопоставление полученных результатов показывает возможность сокращения удельных энергозатрат в 2 – 3 раза при условии поддержания оптимальности ведения технологии на основе использования опытных данных акустического мониторинга зоны помола.

Применение акустической информации для контроля качества измельченного продукта показало также положительные результаты. Датчик, установленный в зоне выхода газозвеси из классификатора, регистрирует сигналы качества и количества готового продукта, поступающего в циклон.

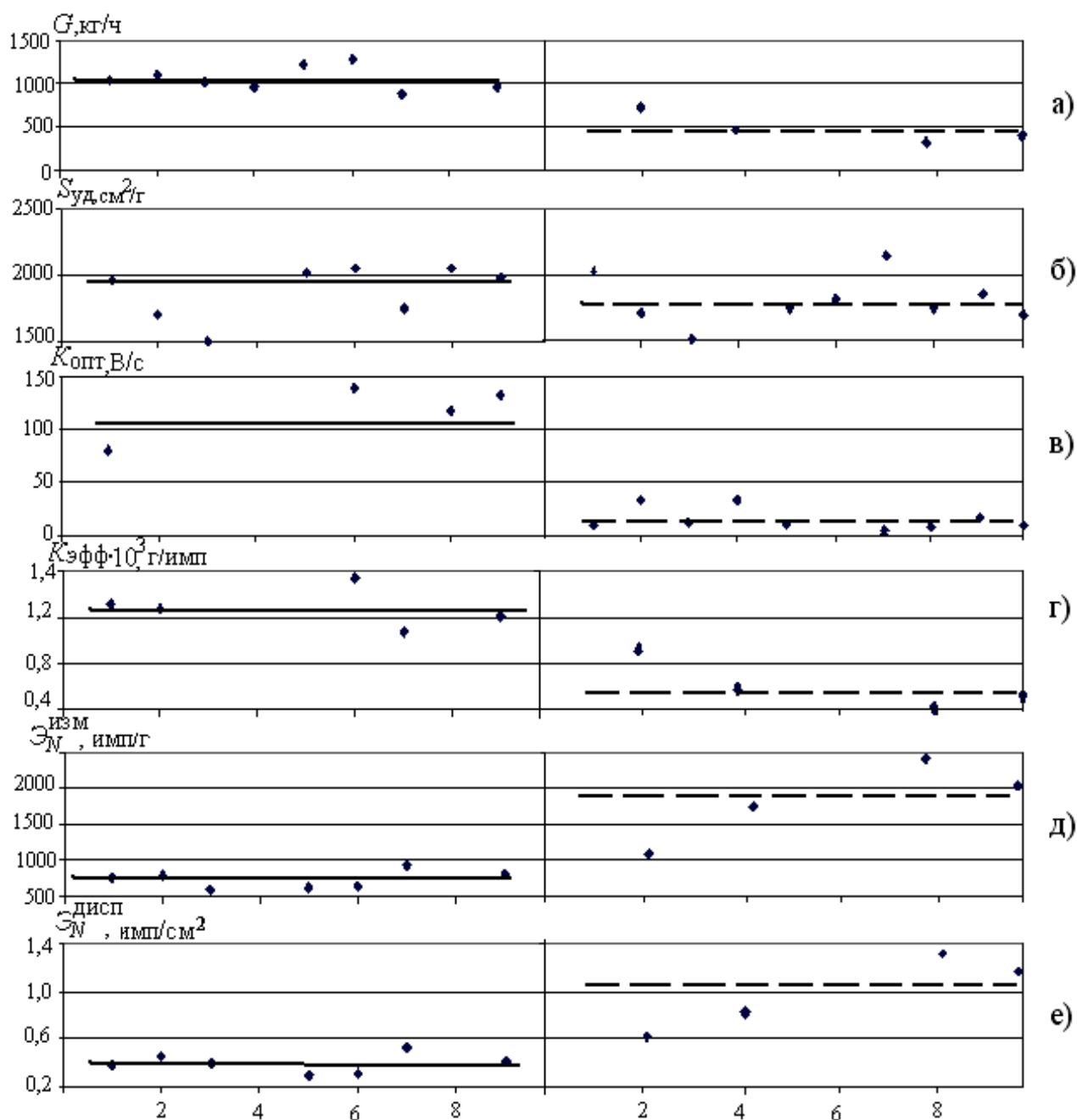


Рис. 1 – Изменение технологических параметров и акустических критериев в оптимальном (—) и неоптимальном (- - -) режиме измельчения циркона в условиях ВГМК

На рис. 2 представлены варианты записей АС в зоне выхода из классификатора измельченного в промышленных условиях циркона различной крупности в диапазоне  $R_{63} = 0 - 3\%$  остатка на контрольном сите с размером отверстий 63 мкм.

На примере тонкого измельчения циркона ( $-63\text{мкм}$ ) в условиях ВГМК установлены ограничения на интервал изменений акустической активности  $\dot{N}$  сигналов с предельно допустимыми значениями амплитуды:  $A \approx 2 \text{ мВ}$ .

Сделаны следующие выводы:

- оптимальное качество циркона достигается при практически полном отсутствии случаев появления АС с амплитудой выше 2мВ;

- допустимое качество соблюдается при активности не более  $\dot{N} = 80\text{с}^{-1}$  акустических сигналов с предельно допустимыми значениями  $A_{2\text{мВ}}$  амплитуды;

- недопустимое качество продукта реализуется при частом появлении повышенной активности сигналов контрольной амплитуды, т.е. более  $\dot{N} = 100\text{с}^{-1}$ , либо значений амплитуд, в 5 – 10 раз превышающих контрольный уровень.

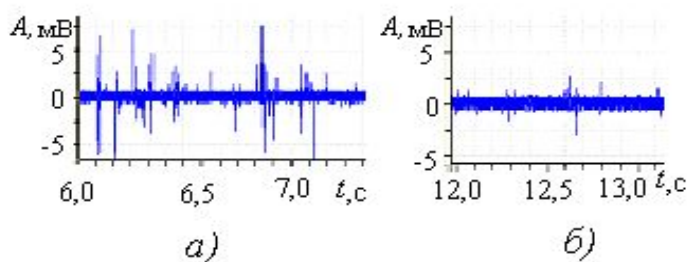


Рис. 2 – Записи АС в случаях изменения качества измельченного циркона: а) некондиционное качество:  $R_{63} = 3\%$ ; б) допустимое качество:  $R_{63} = 1,5\%$ .

Испытания показали, что значения критериев  $K_{эфф}$  и  $K_{опт}$  могут изменяться в зависимости от типоразмера установки, вида измельчаемого материала и требуемой дисперсности продукта. Стабильность высоких значений этих критериев, безусловно, соответствует максимальной эффективности процесса струйного измельчения. Максимально достигаемый уровень акустических критериев при измельчении циркона в промышленной струйной мельнице до 63мкм ( $S_{уд} = 1500 - 2100 \text{ см}^2/\text{г}$ )  $K_{эфф} = (1,6 - 1,35) \cdot 10^{-3} \text{ г/имп}$ ,  $K_{опт} = 140 - 110 \text{ В/с}$ .

Проведенное акустическое исследование позволило предложить алгоритмы контроля оптимальности работы мельницы.

Блок-схемы алгоритмов, включающих поиск и реализацию оптимизации на основе расчета критериев и показателей в ходе акустического мониторинга, показаны на рисунках 3 и 4.

Последовательность действий в процессе применения акустического мониторинга для оптимизации работы струйной измельчительной установки состоит в следующем.

Предварительно согласно техническому заданию устанавливаются необходимые технологические параметры ( $P, n$ ) и на основании имеющихся

опытных данных по измельчению конкретного материала из базы данных задаются допустимые акустические критерии работы струйной мельницы.

В процессе мониторинга измельчения измеряются спектры акустической активности и амплитуд АС, определяются максимальные  $A_{max}$  значения амплитуд и число сигналов  $\dot{N}_{max}$ , ( $c^{-1}$ ) с такой амплитудой за выбранные интервалы времени. По результатам измерений вычисляются текущие значения критерия оптимальности  $K_{opt.}(B/c)$ .

При наличии операции взвешивания готового продукта и контроля кинетики производительности мельницы возможности акустического мониторинга расширяются. Параллельно проведению мониторинга вычисляются значения всех предложенных критериев и показателей.

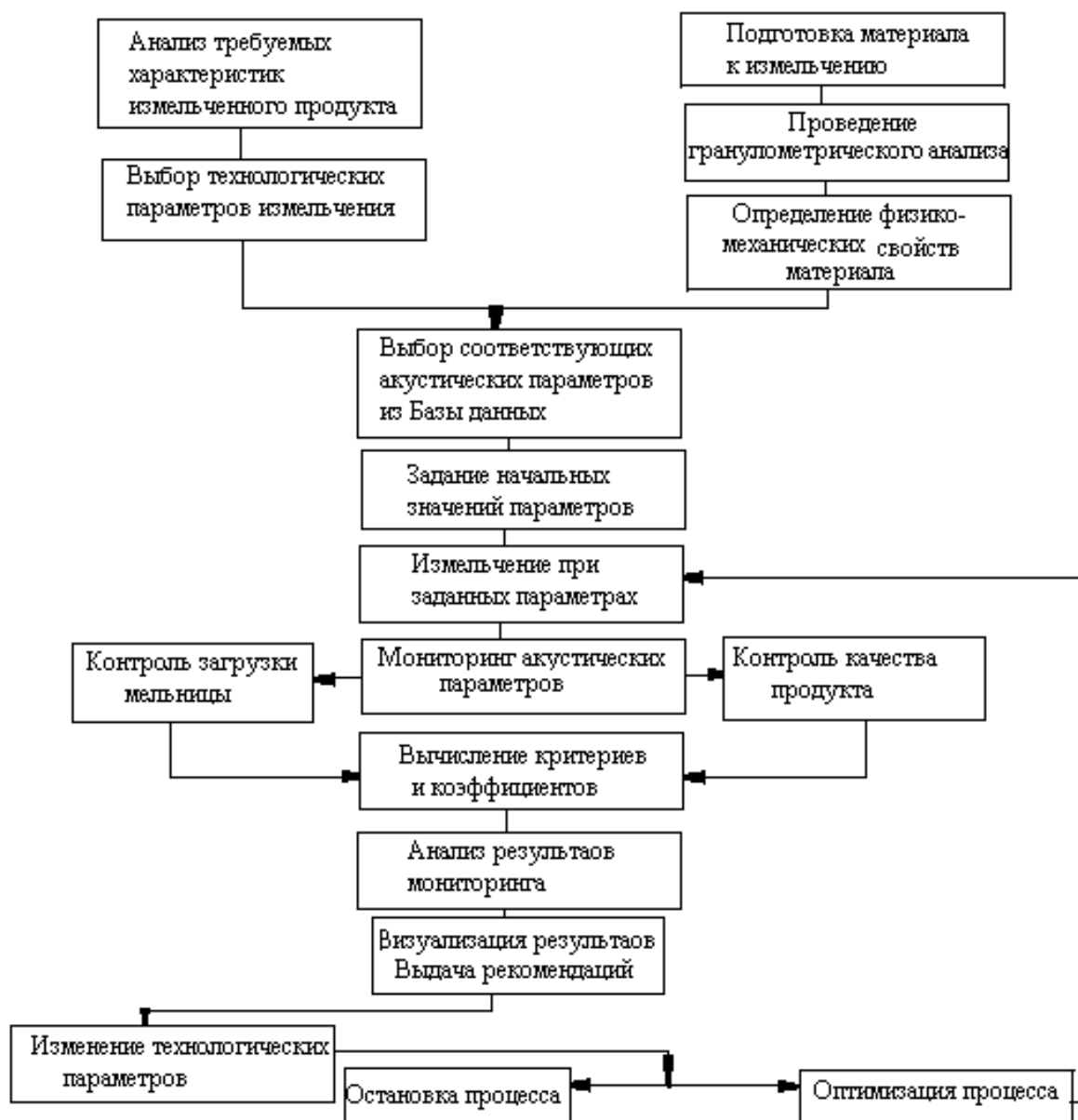


Рис. 3 – Блок-схема струйного измельчения с акустической оптимизацией



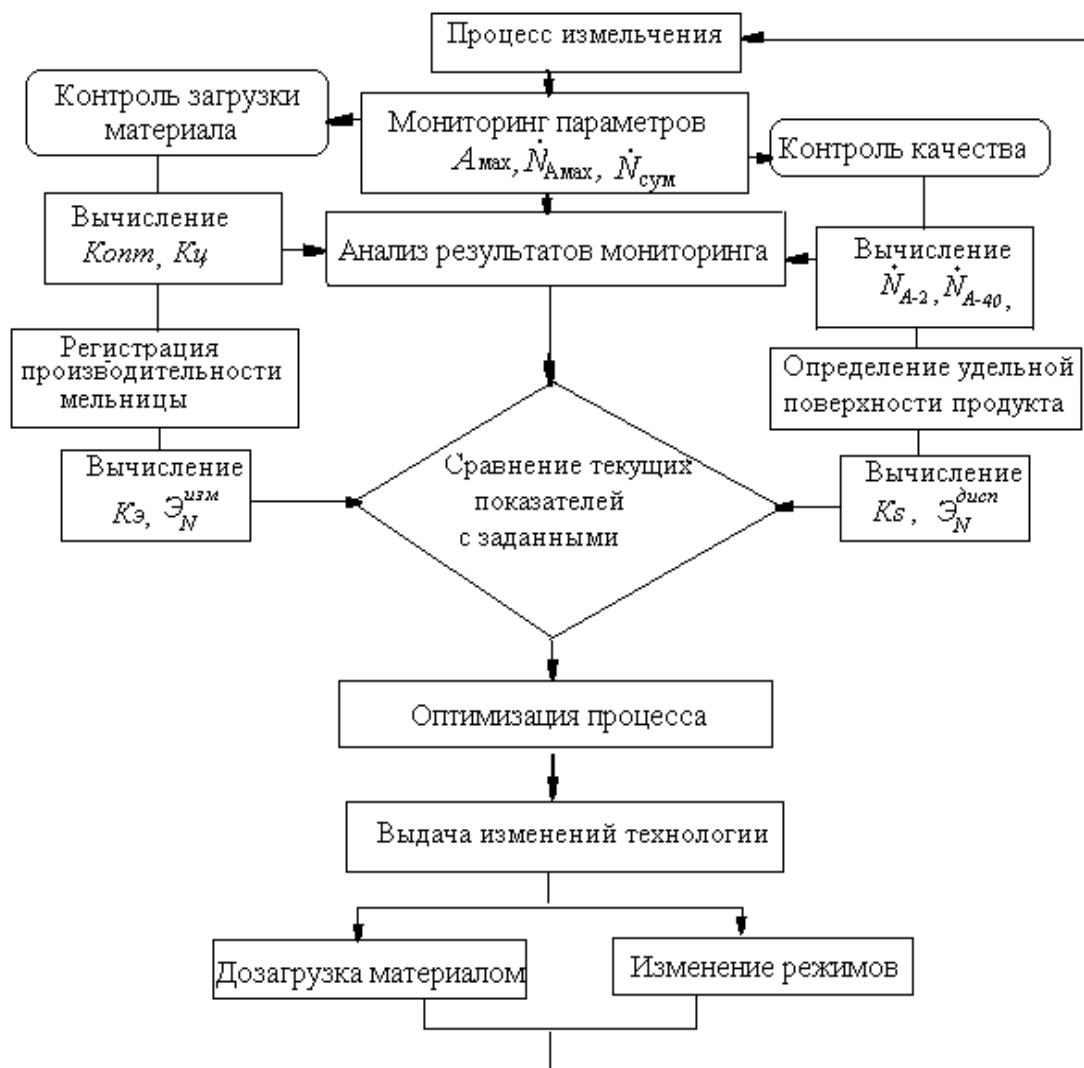


Рис. 4 – Блок – схема акустической оптимизации струйного измельчения

На основе сопоставления расчетных текущих величин критериев с заданными значениями делается вывод о состоянии струй, эффективности и энергоемкости процесса, о качестве получаемого продукта и о дальнейших действиях по регулированию технологии. Если текущая расчетная величина критериев, выбранных для контроля загрузки струй материалом, выходит за рамки допустимых значений, подается сигнал либо на остановку мельницы (по окончании опыта), либо на дополнительную, очередную загрузку порции исходного материала (в случае продолжения опыта). При недопустимом изменении критериев, контролирующих качество продукта, подается сигнал на изменение режима классификации и далее (при необходимости) производится корректировка параметров энергоносителя.

Таким образом, предложенный алгоритм акустического мониторинга процесса тонкого измельчения составит основу поддержания оптимального

режима работы струйных измельчительных установок. Максимальная эффективность измельчения достигается при соблюдении стабильности высоких значений критериев  $K_{эфф}$  и  $K_{онт}$ .

Результаты проведенного исследования позволяют сделать заключение об основных принципах акустической оптимизации процесса тонкого измельчения в струйных измельчительных установках. К ним относятся:

- изменение размеров измельчаемых частиц проявляется в трансформации амплитудных распределений АС таким образом, что параметр дисперсности  $S_{уд}$  коррелирует с долей малоамплитудных сигналов (менее 20 – 40 мВ) в спектре амплитуд, при этом изменяясь обратно пропорционально максимальным значениям  $A_{max}$  амплитуд на стадии разгрузки струй;

- процесс оптимизации процесса реализуется с возрастанием отношения производительности мельницы  $G$  к акустической активности  $\dot{N}_\Sigma$  зоны помола при одновременном уменьшении акустического коэффициента циркулирующей нагрузки  $K_\Sigma$ .

- качество измельченного продукта обеспечивается акустическим контролем изменений дисперсности продукта на входе в циклон с использованием показателя активности малоамплитудных сигналов и ограничением заданной величины минимальных амплитуд (порядка единиц мВ).

**Список литературы:** 1. Куksenко В.С. Кинетические аспекты процесса разрушения и физические основы его прогнозирования / В.С. Куksenко // Прогноз землетрясений. – 1984. – № 4. – С. 8 – 2. 2. Бовенко В.Н. Синергетические эффекты и закономерности релаксационных колебаний в состоянии предразрушения твердого тела: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра физ.-мат. наук: спец. 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» / В.Н. Бовенко. – М., 1990. – 30 с. 3. Тарасов Б.Г. О статистической природе деформационных процессов в горных породах / Б.Г. Тарасов // ФТПРПИ. – 1991. – Т. 6. – С. 36 – 43. 4. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук: 05.15.08 «Збагачення корисних копалин» / Л.Ж. Горобец НГУ. – Днепропетровск, 2004. – 35 с. 5. Pilov P.I. An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles / [P.I. Pilov, L.J. Gorobets, V.N. Bovenko, N.S. Pryadko] // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 6. – С. 23 – 26. 6. Пилов П.И. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице / [П.И. Пилов, В.Н. Бовенко, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко] // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – № 4. – С. 115 – 121. 7. Горобец Л.Ж. Акустические параметры оптимизации процесса струйного измельчения / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко // 36. наукових праць ПолНТУ. – 2012. – Вип. 2 (32). – С. 128 – 136. 8. Прядко Н.С. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения / Н.С. Прядко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 4. – С. 46 – 52

**References:** 1. Kuksenko V.S. Kinetic aspects of destruction process and physical bases of its forecasting / V.S. Kuksenko // Forecast of earthquakes. – 1984. – № 4. – P. 8 – 2. 2. Bovenko V.N. Sinergetical effects

and laws of relaxation fluctuations in a predestruction condition of a firm body: abstract of thesis for the degree dr. of science of Physical and Mathematical sciences: 01.04.07 «Condensed Matter Physics» / V.N. Bovenko. – M., 1990. – 30 p. **3.** Tarasov B.G. About the statistical nature of deformation processes in rocks / B.G. Tarasov // FTPRPI. – 1991. – Т. 6. – P. 36 – 43. **4.** Gorobets L.Zh. Development of scientific bases of firm mineral crushing: abstract of thesis for the degree dr. of science Tehn. Sciences: 05.15.08 «Enrichment of Minerals» / L.Zh. Gorobets. – Dnepropetrovsk, 2004. – 35 p. **5.** Pilov P.I. An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles / [P.I. Pilov, L.J. Gorobets, V.N. Bovenko, N.S. Pryadko] // Naukoviy visnik NMU. – 2008. – № 6. – P. 23 – 26. **6.** Pilov P.I. Acoustic and technical characteristics on a grinding process in a jet mill / P.I. Pilov, V.N. Bovenko, L.Zh. Gorobets, N.S. Prjadko // News of High Schools. Mountain magazine. – 2009. – № 4. – P. 115 – 121. **7.** Gorobets L.Zh. Acoustic parameters of optimization of jet grinding process / L.Zh. Gorobets, N.S. Prjadko // Collected scientific articles of PoINTU. – 2012. – Iss. 2(32). – P. 128 – 136. **8.** Pryadko N.S. Acoustic emission monitoring of jet grinding process / N.S. Pryadko // Technical diagnostics and not destroying control. – 2012. – № 4. – P. 46 – 52.

*Поступила в редколлегию (Received by the editorial board) 23.05.14*

УДК 622.73

**Принципы акустической оптимизации тонкого измельчения / Н.С. ПРЯДКО, Л.Ж. ГОРОБЕЦ, К.А. ЛЕВЧЕНКО, И.В. ВЕРХОРОБИНА** // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 27 (1070). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 71 – 81. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0821.

Обґрунтовано принципи оптимізації процесу тонкого подрібнення, що підтверджені результатами акустичного моніторингу показників роботи лабораторного і промислового струминного млинів. Встановлено критерії й запропоновано алгоритм контролю ефективності процесу і якості тонкодисперсного продукту.

**Ключеві слова:** тонке подрібнення, оптимізація, моніторинг, акустичні параметри, критерії.

UDS 622.73

**Principles of acoustic optimization of fine grinding / N.S. PRYADKO, L.ZH. HOROBETS, K.A. LEVCHENKO, I.V. VERHOROBINA** // Visnyk NTU «KhPI». – 2012. – № 27 (1070). – (Series: Khimiya, khimichna tekhnolohiya ta ecolohiya). – P. 71 – 81. – Bibliogr.: 11 names. – ISSN 2079-0821.

Optimization principles of thin grinding process, confirmed by acoustic monitoring results of acting parameters of laboratory and industrial jet mills are proved. Criteria are established and the control algorithm of process efficiency and quality of a thin dispersion product is offered.

**Key words:** fine grinding, optimization, monitoring, acoustic parameters, criteria.