

П.И. ПИЛОВ, д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «НГУ», Днепропетровск,
Л.Ж. ГОРОБЕЦ, докт. техн. наук, проф., ГВУЗ «НГУ»,
Днепропетровск,
Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук, ст. научн. сотруду., ИТМ НАН и НКА
Украины, Днепропетровск,
К.А. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «НГУ»,
Днепропетровск,
Л.А. ЦЫБУЛЬКО, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «НГУ»,
Днепропетровск,
И.В. ВЕРХОРОБИНА, инж., ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ СТРУЙНОЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Обоснован критерий оценки работы струйной мельницы с позиций оптимизации процесса измельчения. Установлена величина критерия в лабораторных и промышленных условиях измельчения твердых сыпучих материалов.

Постановка проблемы. Проблема установления и поддержания эффективного режима измельчения при заданном качестве тонкодисперсного продукта (с удельной поверхностью более $0,5 - 1,0 \text{ м}^2/\text{г}$) является важной и актуальной из-за повышенной энергоемкости процессов тонкого измельчения (диспергирования). Анализ физических закономерностей измельчения [1, 2] и экспериментальных исследований работы струйных мельниц [3 – 5] позволяет считать перспективным использование акустоэмиссионной информации об эффектах разрушения частиц в зоне помола для разработки критерия оптимизации процесса струйного измельчения. Впервые применение метода акустической эмиссии (АЭ) для оценки эффектов измельчения при нагружении трехосным сжатием модельных образцов горных пород показано в работе [1]. При этом научную базу для выбора оптимальных режимов измельчения составили закономерности развития стадии диспергирования с учетом современной теории предразрушения твердого тела [6].

В настоящее время прогнозная оценка удельных энергозатрат на измельчение осуществляется на основе следующих параметров АЭ: скорости

счета \dot{N} акустических сигналов (АС) за пределом прочности и акустоэмиссионной эффективности разрушения N_ε ($N_\varepsilon = N/\varepsilon$, N – суммарный счет АС за период нагружения, ε – деформация за пределом прочности). Экспериментально показано, что при накоплении сигналов преимущественно малых амплитуд ожидается повышенное количество тонких фракций микронных размеров в разрушенном продукте.

Анализ исследований. Производительность струйной мельницы значительно изменяется в зависимости от степени загрузки струй материалом. Избыточное или недостаточное количество твердой фазы в струе приводит к отклонению от оптимального уровня ведущих параметров измельчения: скорости и частоты соударений частиц, что обуславливает уменьшение производительности мельницы при прочих равных условиях (параметры энергоносителя, режим работы классификатора и пневмотранспортной системы).

В работах [4, 5] предложена методика акустического мониторинга работы струйной мельницы, которая позволяет контролировать изменение загрузки мельницы материалом с помощью анализа акустических параметров зоны измельчения. Это означает, что выявление оптимального наполнения струй твердой фазой и поддержание оптимального режима работы струйной мельницы возможно на основе непрерывного контроля акустических параметров зоны помола с последующим управлением загрузкой измельчаемого материала. При этом весьма информативны акустическая активность и амплитудные распределения акустических сигналов [7]. В работе [8] установлены закономерности изменения акустической активности зоны помола в зависимости от производительности лабораторной струйной мельницы и степени дисперсности продукта, оцениваемой по величине удельной поверхности. Степень приближения процесса измельчения к оптимальным условиям характеризуют условным коэффициентом K_ε (г/имп) эффективности измельчения ($K_\varepsilon = G / \lg \dot{N}$), определяемым как отношение производительности мельницы G к логарифму акустической активности зоны помола.

Постановка задачи. Целью данной работы является обоснование и экспериментальное определение акустического критерия для оценки работы струйной мельницы, включающего значения амплитуды и числа АС в зоне помола. В работе предусматривается анализ акустической информации о работе лабораторной мельницы на ряде сыпучих твердых материалов и результатов промышленного опробования акустического мониторинга в условиях ВГМК на примере струйного измельчения цирконового концентрата.

Изложение основного материала и результаты исследования.

Экспериментальные исследования по установлению величины акустического критерия проведены при измельчении сыпучих материалов в лабораторной и промышленной струйной установках соответственно для типоразмеров УСИ-20 производительностью 20 кг/ч и УСИ-2000 – 2000 кг/ч.

Акустическую активность зоны помола измеряли с помощью датчика, соединенного с латунным волноводом, установленным внутри помольной камеры мельницы. Анализ акустических сигналов проводился по следующей методике. Рассматривались АС с величиной амплитуды более 20мВ при частоте регистрации 400 кГц (200 кГц). В ходе мониторинга периодически, за выбранный интервал времени (порядка нескольких десятков секунд или миллисекунд) вычислялись значения максимальной амплитуды A_{max} , общей \dot{N}_{Σ} и частной $\dot{N}_{A_{max}}$ активности акустического излучения зоны помола, рассчитываемой по суммарному счету N_{Σ} АС и выборке числа АС с максимальной амплитудой за период τ . За максимальную величину амплитуды принималась амплитуда сигналов, число которых в общей сумме сигналов составляло величину $\dot{N}_{A_{max}} \geq (5 - 7)\% \cdot \dot{N}_{\Sigma}$. Поскольку амплитуда АС при соударениях частиц с волноводом в зоне помола пропорциональна скорости удара, увеличивающей эффект разрушения, полагаем, что акустические сигналы максимальной амплитуды характеризуют наиболее эффективные соударения частиц с максимальными эффектами измельчения. Другим важным фактором струйного измельчения является частота эффективных соударений частиц, характеризуемая акустической активностью. В этой связи величину акустического критерия K_a оптимальной работы мельницы определяем как произведение величины максимальной амплитуды A_{max} на общую \dot{N}_{Σ} или частную $\dot{N}_{A_{max}}$ величину акустической активности:

$$K_a(\dot{N}_{\Sigma}) = A_{max} \cdot \dot{N}_{\Sigma}; \quad K_a(\dot{N}_{A_{max}}) = A_{max} \cdot \dot{N}_{A_{max}}; \quad (1)$$

С позиций физики разрушения предложенный критерий характеризует акустический эффект трансформации кинетической энергии ускоренных струями частиц в акустическую энергию трещинообразования при разрушении частиц ударами и, таким образом, величина предложенного критерия (В/с) теоретически пропорциональна энергонапряженности разрушения частиц в процессе струйного измельчения.

Обработка экспериментальных данных показала, что предпочтительнее проводить расчет по первой формуле из-за более широкого диапазона изменения критерия в различных режимах измельчения. Анализ данных акустического мониторинга процесса струйного измельчения различных сыпучих материалов (кварцевый песок, шлак, шамот, циркон, уголь) позволил обозначить границы (допустимые и недопустимые с позиций оптимальности процесса) изменения K_a за один технологический цикл измельчения (загрузка одной порции, измельчение, разгрузка струи, выгрузка продукта). Оптимальная величина K_a соответствует диапазону $(19 - 35) \cdot 10^3$ В/с, допустимая $K_a^{don} = (6 - 17) \cdot 10^3$ В/с и недопустимая $K_a^{nedon} = (0,4-6) \cdot 10^3$ В/с.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Условия и результаты струйного измельчения с расчетными значениями акустического критерия K_a оптимальной работы мельницы

№	Материал	$d_{исх}$, мм	ρ , г/см ³	$K_a \cdot 10^{-3}$, В/с			A_{max} , мВ	\dot{N}_Σ , мс ⁻¹	n , мин ⁻¹	Q , кг/ч	$S_{уд}$, м ² /г
				1*	2*	3*					
Лабораторная струйная мельница УСИ-20											
1	кварц. песок	0,3	2,65	35,5	17,0	5,4	250	142	2000	4,0	0,7
2	газ. уголь	0,1	1,4	12	6	2	100	200	1800	6,2	0,98
3	шлак	2,5	2,9	32	15,7	3,3	160	200	2000	5,4	0,61
4	циркон	0,16	4,7	16,1	10	6	140	115	600	19	0,21
5	циркон	0,16	4,7	10	2	0,4	100	100	2000	2,7	0,55
6	шамот	2,5	2,8	23	16	2,3	240	96	2000	8,0	0,59
Промышленная струйная установка УСИ-2000											
7	циркон	0,16	4,7	34	21	11	180	189	180	800	0,19

Примечание: 1* – оптимальные, 2* – неоптимальные, 3* – недопустимые режимы измельчения

Проведенные испытания и расчеты показали, что величина критерия оптимальности струйного измельчения изменяется в зависимости от свойств исходного материала (плотности, размера частиц), измельчаемости исследуемым методом и дисперсности $S_{уд}$ измельченного продукта (удельной поверхности). Данные табл. показывают, что повышение плотности материала обуславливает некоторое снижение производительности мельницы. При этом величина критерия оптимальности также уменьшается при измельчении материалов повышенной плотности, что можно наблюдать на примерах циркона и кварцевого песка: для циркона $K_a = 16,1 \cdot 10^3$, для кварцевого песка $K_a = 35,5 \cdot 10^3$. Для недопустимого (неэффективного, с низкой производительностью мельницы) режима измельчения величина критерия K_a практически

одинакова для одного порядка дисперсности измельченных продуктов: $K_a = (2 - 3) \cdot 10^3$ при $S_{y\partial} = 0,59 - 0,61 \text{ м}^2/\text{г}$. На рис. 1 приведены записи акустического излучения рабочей зоны лабораторной и промышленной установок при струйном измельчении цирконового концентрата.

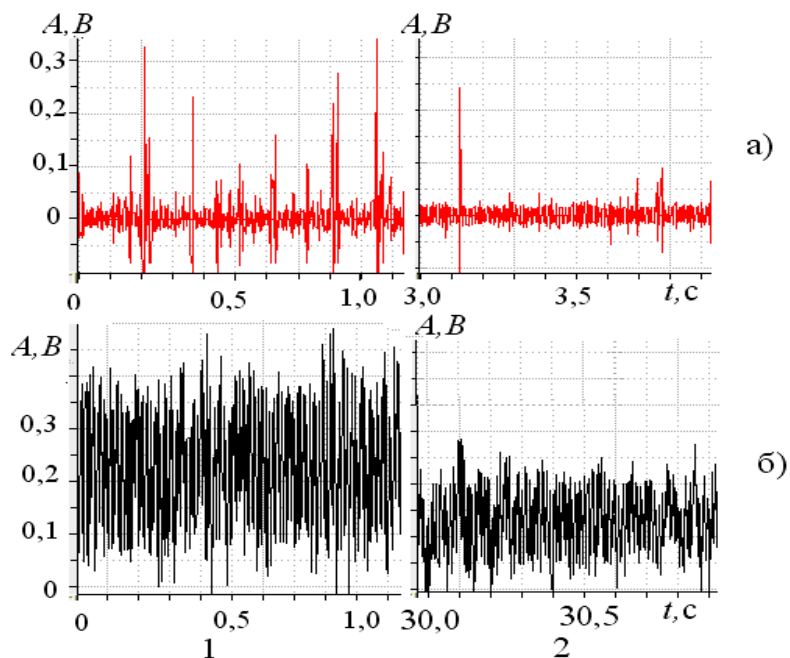


Рис. 1 – Записи акустических сигналов зоны помола цирконового концентрата в лабораторной (а) и промышленной установках (б):
1 – оптимальный режим, 2 – недопустимый режим.

На рис. 2 выполнен анализ акустической активности \dot{N} струйного измельчения цирконового концентрата в оптимальном (1) и недопустимом (2) режиме работы лабораторной (а) и промышленной (б) мельниц. Как установлено, акустическим признаком выхода мельницы из оптимального режима в недопустимый (неэффективный) режим является значительное сужение распределений активности АС по амплитудам. Сравнительный анализ акустических параметров позволяет считать более эффективной работу промышленного образца струйной мельницы, что подтверждается расчетными данными акустического критерия, приведенными в табл. 1. Рис. 3 иллюстрирует кинетику акустического критерия оптимальной работы лабораторной и промышленной мельниц при измельчении циркона. Видно, что в пределах одного технологического цикла измельчения наблюдается тенденция уменьшения величины K_a , объясняемая текущей разгрузкой струй от твердой фазы в процессе удаления готового продукта в циклон, причем, угол наклона этой зависимости значительно больший для промышленных условий измельчения.

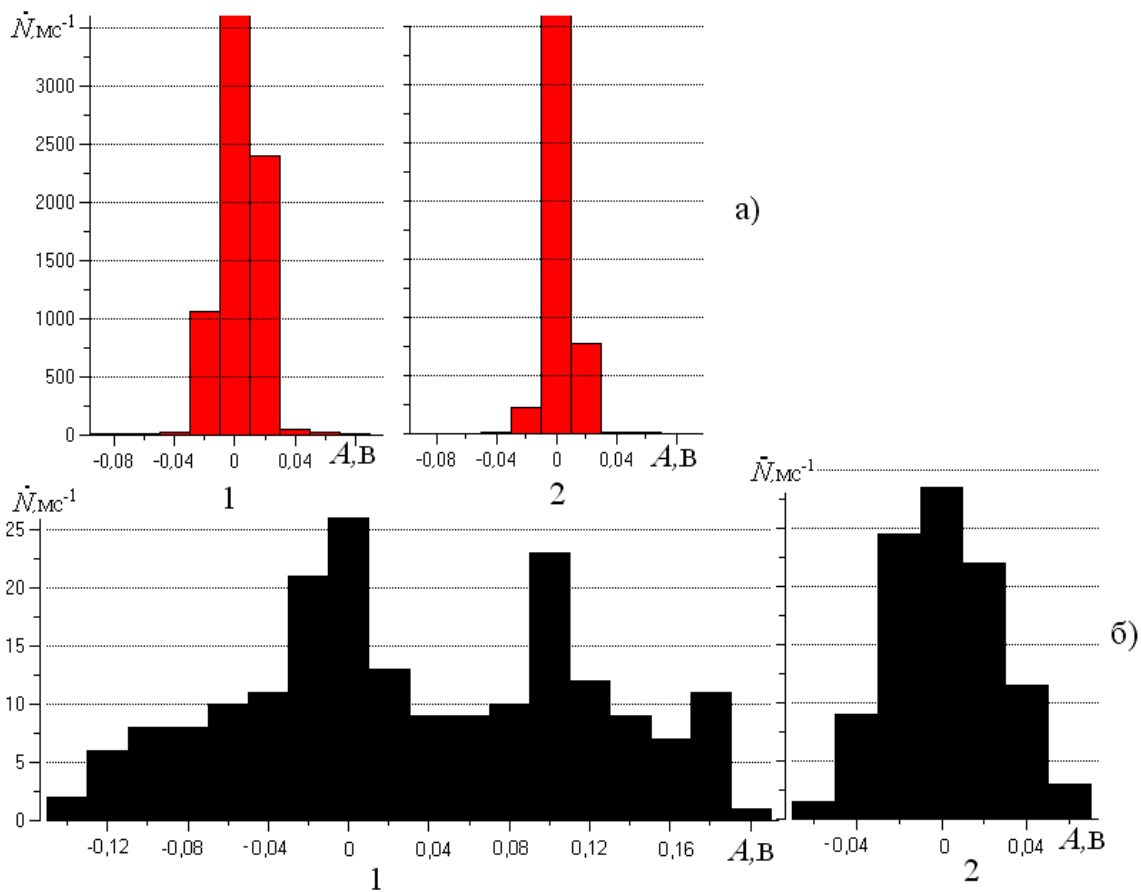


Рис. 2 – Анализ акустической активности \dot{N} струйного измельчения цирконового концентрата в оптимальном (1) и недопустимом (2) режимах на лабораторной (а) и промышленной (б) мельницах

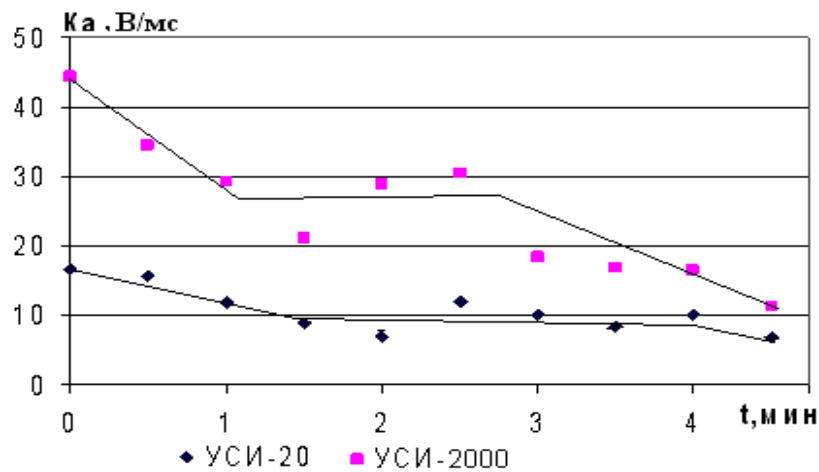


Рис. 3 – Кинетика акустического критерия оптимальной работы лабораторной и промышленной мельниц при измельчении циркона

Следовательно, крайне важна своевременная загрузка новых порций исходного материала с проведением непрерывного акустического мониторинга, что позволит обеспечить величину критерия оптимальности на уровне выше

$K_a^{доп}$. Границы $K_a^{доп}$ для других измельчаемых материалов в условиях лабораторной мельницы показаны на рис. 4.

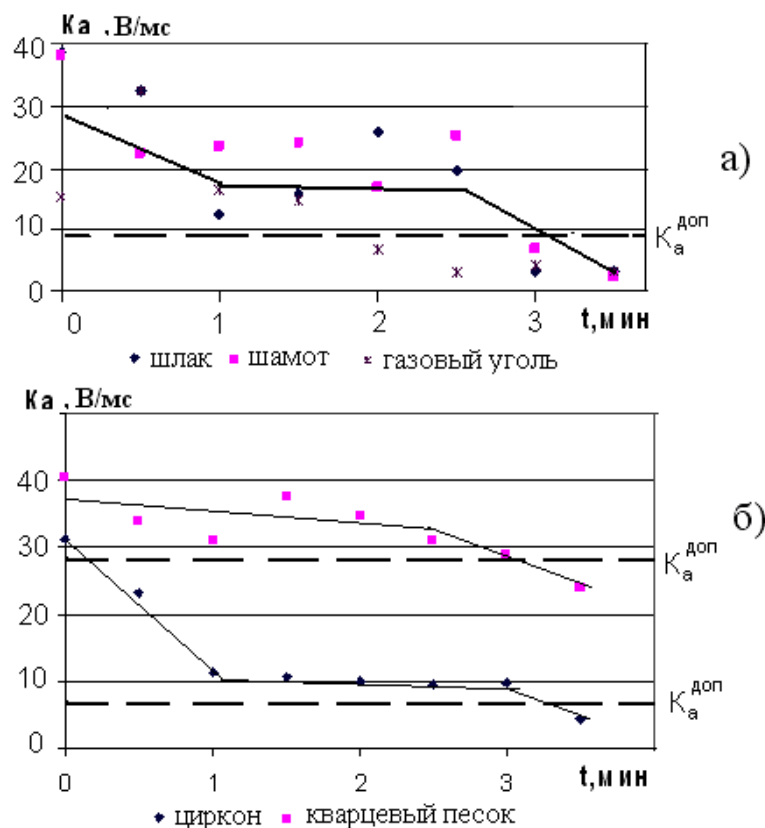


Рис. 4 – Кинетика акустического критерия оптимальной работы струйной мельницы при измельчении разнообразных сыпучих материалов

Полагаем, что граница допустимости критерия должна соответствовать переходу оптимального режима измельчения в неоптимальный режим, так чтобы исключить появление недопустимых режимов работы мельницы с меньшей производительностью.

Исследование показало, что рекомендуемый уровень значений K_a находится в зависимости от соблюдаемой дисперсности готового продукта: при $S_{уд} = 0,6 - 0,7 \text{ м}^2/\text{г}$ (песок, шамот, шлак) $K_a = (23 - 35) \cdot 10^3 \text{ В/с}$, тогда как при $S_{уд}$ до $0,98 \text{ м}^2/\text{г}$ (газовый уголь) $K_a = (12 - 15) \cdot 10^3 \text{ В/с}$. Проведенное акустическое исследование послужило основой для разработки алгоритма контроля оптимальной работы струйной мельницы. Блок-схема алгоритма, включающего расчет критерия оптимальности K_a в течение акустического мониторинга, представлена на рис. 5.

Предварительно устанавливаются необходимые технологические параметры (P, n, t) и на основании имеющихся опытных данных по измельчению

конкретного материала задается допустимый акустический критерий оптимальной $K_a^{\text{доп}}$ работы струйной мельницы. В процессе акустического мониторинга процесса измельчения измеряется спектр активности и амплитуд АС, определяются максимальные амплитуды A_{max} и общее число сигналов \dot{N}_z за выбранные интервалы (Δt , с, мс) времени. По результатам измерений вычисляются текущие значения критерия оптимальности K_a , которые сравниваются с заданным допустимым значением критерия $K_a^{\text{доп}}$. Если текущая расчетная величина критерия снижается до уровня менее $K_a^{\text{доп}}$, проводится контроль качества получаемого продукта. При соблюдении технологических параметров процесса на заданном уровне, подается сигнал либо на остановку мельницы (по окончании опыта), либо на дополнительную, очередную загрузку порции исходного материала (в случае продолжения опыта).

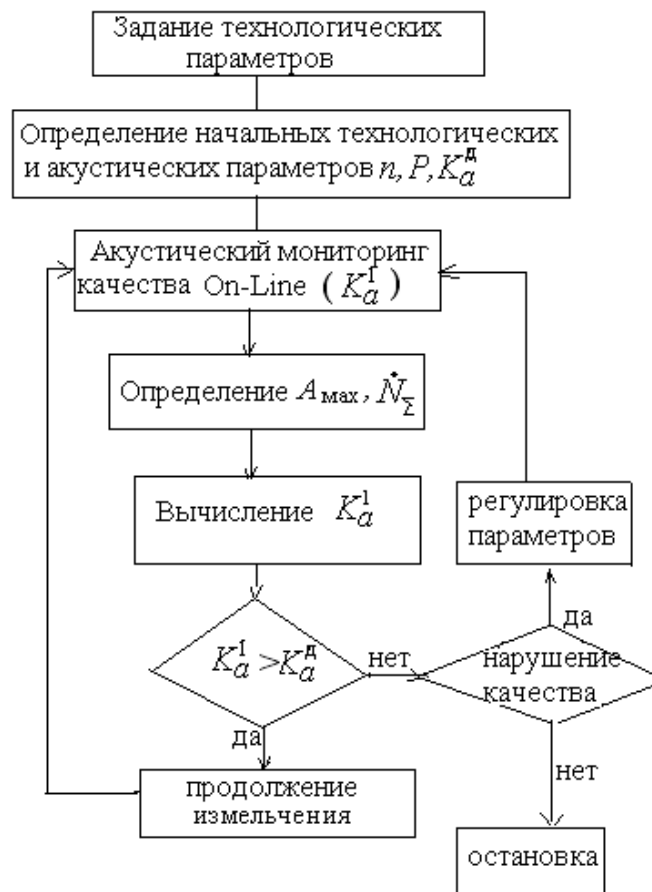


Рис. 5 – Алгоритм контроля оптимальной работы струйной измельчительной установки

Выводы.

В результате теоретического обоснования и экспериментального исследования процесса струйного измельчения предложен акустический критерий

для оценки степени оптимальности работы измельчительной установки.

В условиях измельчения разнообразных сыпучих материалов установлены оптимальные и предельно допустимые значения предложенного критерия, включающего наиболее важные акустические параметры – амплитуду и активность акустического излучения зоны помола.

Разработан алгоритм контроля оптимальной работы струйной мельницы, включающий расчет критерия оптимальности K_a в течение акустического мониторинга зоны помола.

Список литературы: 1. Горобец Л.Ж. Исследование акустоэмиссионных свойств природных материалов в режиме высоких давлений / [Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, С.Б. Дуброва и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 1995. – № 3. – С. 65 – 73. 2. Пилов П.И. Технологические возможности струйных измельчителей / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина // ГИАБ. – 2007. – № 3. – С. 359 – 367. 3. Пилов П.И. Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко и др.] // ЗКК – 2008. – № 34 (75). – С. 67 – 74. 4. Пилов П.И. Параметры мониторинга и показатели струйного измельчения полезных ископаемых / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко // Вісник КТУ. – 2010. – Вип. 27. – С. 59 – 64. 5. Пилов П.И. Исследование рабочей зоны струйной мельницы на основе акустического мониторинга / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др.] // VIII Конгресса обогатителей стран СНГ, 28 февр. – 2 мар. 2011 г.: сборник докл. – М., 2011. – Т. 1. – С. 302 – 305. 6. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: автореф. дисс. ... доктора техн. наук: спец. 05.15.08 «Збагачення корисних копалин» / Л.Ж. Горобец. – Днепропетровск, 2004. – 36 с. 7. Пилов П.И. Исследование амплитудных распределений акустических сигналов процесса струйного измельчения / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др.] // Разработка рудных месторождений. – 2011. – Вып. 94. – С. 266 – 268. 8. Пилов П.И. Акустические «образы» режимов струйного измельчения / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др.] // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – № 65. – С. 127 – 138.

Поступила в редколлегию 20.08.12

УДК 622.73

Обоснование критериев оптимальной работы струйной измельчительной установки / П.И. ПИЛОВ, Л.Ж. ГОРОБЕЦ, Н.С. ПРЯДКО, К.А. ЛЕВЧЕНКО, Л.А. ЦЫБУЛЬКО, И.В. ВЕРХОРОБИНА // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 48 (954). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 37 – 45. – Библиогр.: 8 назв.

Обґрунтовано критерій оцінки роботи струменевого млина з позицій оптимізації процесу подрібнення. Встановлено величина критерію в лабораторних і промислових умовах подрібнення твердих сипких матеріалів.

An assessment criterion of jet mill work from positions of grinding process optimization is proved. The criterion value in laboratory and industrial conditions of firm loose materials grinding is established.