

П.И. ПИЛОВ, докт. техн. наук, проректор, НГУ, Днепропетровск,
Л.Ж. ГОРОБЕЦ, докт. техн. наук, проф., НГУ, Днепропетровск,
Н.С. ПРЯДКО, канд. техн. наук, ст. научн. сотруду.,
ИТМ НАН Украины, Днепропетровск,
Л.А. ЦЫБУЛЬКО, канд. техн. наук, доц., НГУ, Днепропетровск,
И.В. ВЕРХОРОБИНА, инж., ИГТМ НАН Украины, Днепропетровск

АКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ РАБОТЫ СТРУЙНЫХ МЕЛЬНИЦ РАЗЛИЧНОГО ТИПОРАЗМЕРА

Встановлено закономірності акустичного моніторингу процесу струминного подрібнення твердих сипучих матеріалів в установках різного типорозміру.

Установлены закономерности акустического мониторинга процесса струйного измельчения твердых сыпучих материалов в установках разного типоразмера.

Acoustic monitoring laws of jet grinding process of firm loose materials in various size mills are established.

Постановка проблемы. Для тонкого измельчения и механоактивации тонкодисперсных редкометальных концентратов, сырьевых материалов в производстве стекловолокна и строительной керамики нашли применение установки струйного измельчения [1, 2]. В области получения тонкодисперсных порошков по-прежнему актуален вопрос повышения эффективности процесса. Согласно развивающейся теории тонкого измельчения высокие эффекты диспергирования достигаются путем увеличения плотности энергии при разрушении измельчаемых частиц [3 – 5]. Рекомендуется повышение скорости $\dot{\epsilon}$ относительной динамической деформации материала при разрушении ($\dot{\epsilon} = V/d$, где V – скорость удара, d – размер нагружаемого тела), в частности, при струйном измельчении – высокодинамичное импульсное нагружение частиц ударами или истиранием в противоточных или вихревых потоках энергоносителя.

В установках струйного измельчения достигается высокий уровень дисперсности (1 – 10 мкм) порошков с удельной поверхностью порядка 0,5 – 2 м²/г. Измельчение в струях осуществляется без ограничений на твердость, структурные и физико-механические свойства материалов. Опыт про-

мышленной эксплуатации газоструйных мельниц показал наиболее высокую эффективность применения нагретого энергоносителя при измельчении цирконового концентрата в условиях Вольногорского ГМК и шлака на Волгоградском керамическом заводе [6].

К режимным параметрам струйного измельчения относятся: концентрация твердой фазы в струе, скорость ударов и размеры частиц, ускоренных струями. Как показали исследования, режим загрузки струй при прочих равных условиях (дисперсность продукта, параметры энергоносителя, режим классификации) определяет концентрацию и скорость частиц твердой фазы, что влияет на уровень производительности мельницы и соответственно эффективность измельчения. Поддержание оптимального содержания твердой фазы в струях в процессе работы мельницы предполагается реализовать путем непрерывного контроля акустической активности зоны помола и управления загрузкой измельчаемого материала.

Как показано в работах [3, 7], существует корреляционная связь количества мелких и тонких фракций (менее 100 – 400 мкм), образованных при разрушении сжатием модельных образцов горных пород, от удельного счета акустических сигналов (АС). Образование и рост размеров трещин в зонах дробления и измельчения нагружаемого образца сопровождаются изменением амплитуд сигналов акустической эмиссии (АЭ). При переходе от начала нагружения к разрушению характерная амплитуда сигналов АЭ может увеличиваться от десятков милливольт до единиц вольта.

Исследование кинетики струйного измельчения также возможно с применением акустического мониторинга зоны помола. Акустическое излучение контролируется счетом сигналов (АС), значениями амплитуд и активностью $\dot{N}(\tau)$ акустической эмиссии (\dot{N} – активность, АЭ – число сигналов в единицу времени). Изменение плотности потока частиц в струях, от которой зависит вероятность столкновений частиц в зоне помола, сопровождается изменением активности \dot{N} акустического излучения этой зоны. Повышение уровня акустической активности зоны помола на любой стадии является положительным фактором процесса измельчения, поскольку выход мелких фракций при прочих равных условиях (крупности частиц, скорости удара, параметрах энергоносителя) прямо пропорционален числу соударений частиц. Для материалов с различной измельчаемостью (шамот, шлак, уголь) оптимальный диапазон акустической активности зоны струйного помола в области эффективного измельчения составляет $\dot{N} = 10^{3,5} - 10^{5,3}$ [8].

Результаты работ [8, 9] показали, что управление процессом струйного измельчения должно исходить из информации, предоставляемой акустическим мониторингом о размерах частиц и состоянии загрузки струй, а затем на основе анализа полученной информации - обеспечить своевременную подачу порций материала для достижения максимальной эффективности процесса измельчения.

Целью данной статьи является установление закономерностей акустического мониторинга работы струйной мельницы. Для этой цели проведен анализ результатов исследований струйных мельниц нескольких типоразмеров: УСИ-02, УСИ-20, УСИ-1000 с различной производительностью (от 0,2 – 20 до 1000 кг/ч).

Основное содержание исследований. Измельчали порошки не крупнее 2,5 мм различной плотности и твердости: кварцевый песок, цирконовый концентрат, металлургический шлак, шамот, уголь. В режимах измельчения изменяли давление энергоносителя, частоту вращения ротора классификатора, степень загрузки струй материалом. Определение дисперсности готового продукта проведено путем определения величины $S_{уд}$ удельной поверхности на приборах Т-3 В.В. Товарова и фирмы «MALVERN» [10]. Измерение акустических параметров в зоне помола осуществлялось с помощью широкополосного апериодического датчика, смонтированного на торце латунного волновода. Другой конец волновода размещался внутри помольной камеры мельницы. Датчик соединяли с аналого-цифровым преобразователем акустических сигналов и компьютером. Время регистрации АС при частоте 400 кГц составляло 0,1с, интервал измерения – 10 – 60 с. При определении амплитудных распределений АС некоторое минимальное значение амплитуды (менее 5 мВ) принималось за нулевой уровень отсчета величины амплитуды за период измерения.

Исследования работы мельниц различных типоразмеров показали, что в акустическом мониторинге наиболее важную информацию о процессе измельчения содержит изменение скорости счета \dot{N} акустической активности зоны помола, а также распределения амплитуд по величине с определением их количества для характерного значения (максимального или минимального). Изменение размеров частиц в процессе струйного измельчения приводит к изменению величины амплитуд сигналов АЭ при соударениях частиц с волноводом.

На рис. 1 рассмотрена кинетика значений амплитуды АС при измельчении в

струйной мельнице УСИ-20 лабораторного типа (2 – 20 кг/ч) различных твердых материалов: известняка, шамота, угля крупностью менее 2,5 мм. Исследование проводилось при частоте $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ на различных стадиях загрузки струй материалом (загрузка, рабочий режим, разгрузка). Видно, что изменение режима загрузки струй обуславливает изменение размеров частиц и соответственно амплитудного распределения акустических сигналов. Переход амплитудного распределения АС в область меньших значений амплитуд характеризует начало разгрузки струй в результате завершения измельчения и удаления кондиционной фракции в циклон-пылеосадитель.

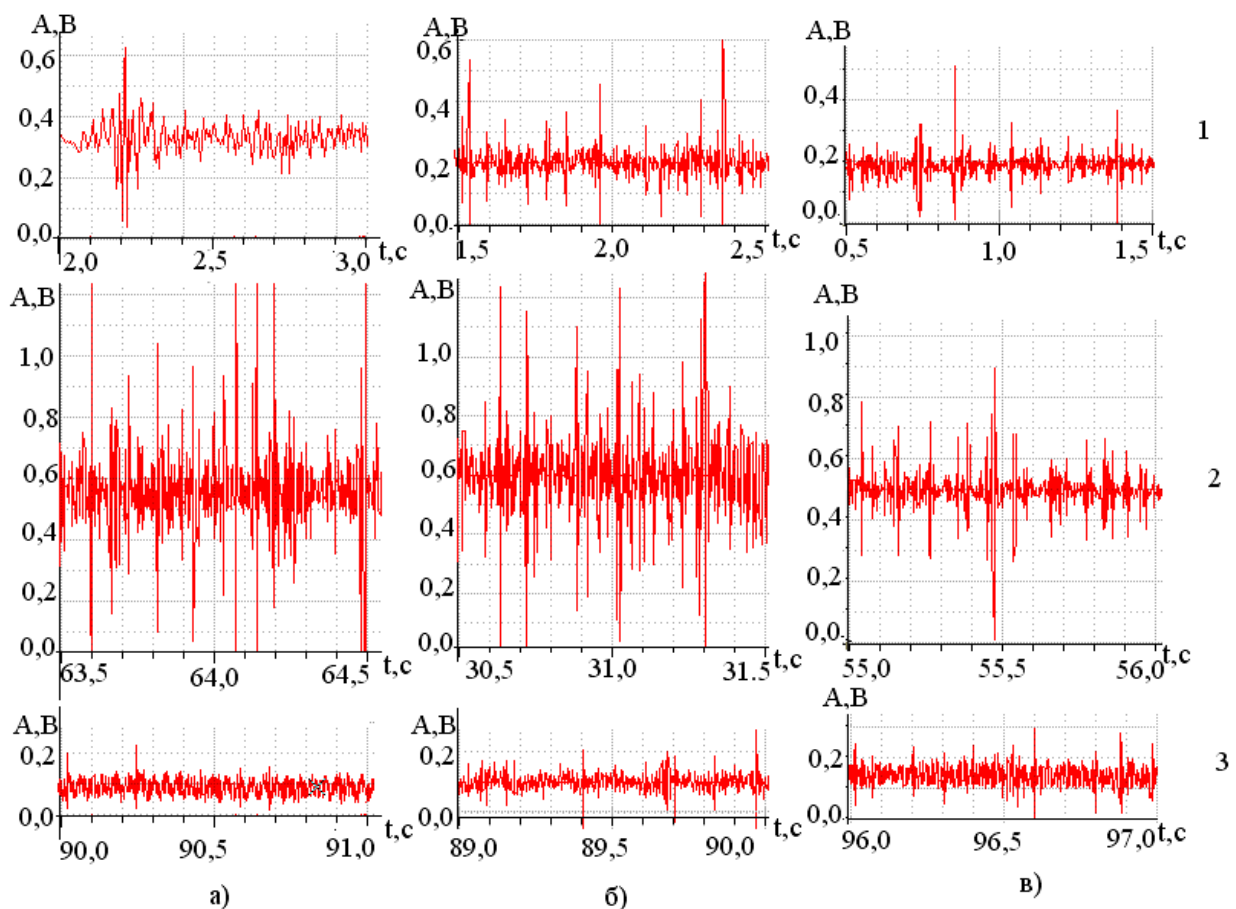


Рис. 1. Записи кинетики амплитуд АС при струйном измельчении в УСИ-20 известняка (а), шамота (б), угля (в) в различных состояниях струй:

1 – при загрузке материала, 2 – в рабочем режиме, 3 – при разгрузке струй;
 $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,3 \text{ МПа}$

На рис. 2 показано увеличение амплитуды АС с крупностью d измельчаемых частиц в начале измельчения (первые секунды). Видно, что на степень зависимости $\lg A$ ($\lg d$) влияет плотность материала (в диапазоне $1,4 - 4,7 \text{ г/см}^3$): причем, чем выше плотность вещества, тем больше амплитуда $A_{\text{макс}}$ при прочих рав-

ных условиях. Это влияние усиливается при крупности частиц выше 0,2 мм. Исследования показали, что по мере разгрузки струй с течением процесса измельчения размеры частиц уменьшаются, возрастает величина их удельной поверхности, что сопровождается закономерным уменьшением максимальных значений амплитуд и роста счета малоамплитудных сигналов (менее 0,2 В) в спектрах акустического излучения зоны помола.

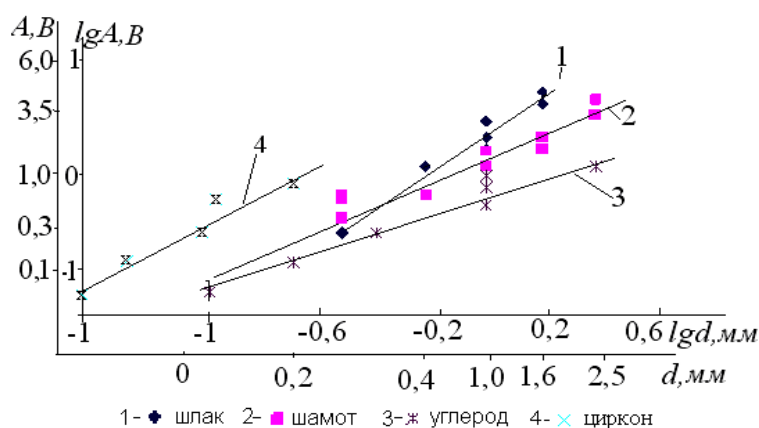


Рис. 2. Влияние размера измельчаемых частиц на величину амплитуд АС в рабочей зоне в первые секунды ($\tau = 1 - 3$ с) струйного измельчения.

Проявляется закономерность накопления АС (с 30 – 50 до 80 – 90 %) минимальной амплитуды (для циркона – менее 5 мВ) к моменту завершения измельчения и разгрузки струй. С получением такой информации о начале разгрузки струй для продолжения измельчения необходимо производить дозагрузку новой порции материала.

На рис. 3 показано изменение акустической активности \dot{N} зон помола для установок различного типоразмера с изменением диапазона малоамплитудных сигналов. Проявляется закономерность накопления АС (с 30 – 50 до 80 – 90 %) минимальной амплитуды (для циркона – менее 5 мВ) к моменту завершения измельчения и разгрузки струй.

На рис. 4 сопоставлены амплитудные распределения АС зоны помола промышленной струйной мельницы с гранулометрическими распределениями частиц исходного материала и измельченного продукта в различных режимах измельчения цирконового концентрата.

Анализ графиков позволяет сделать вывод об уменьшении преимущественных значений амплитуд (графики 4 б) с повышением частоты n вращения ротора классификатора. Увеличение давления энергоносителя (сжатого воздуха) сопровождается ростом максимальных значений $A_{\text{макс}}$ амплитуд АС

(графики 4 в).

На рис. 5 показано влияние дисперсности измельченного продукта на максимальные значения $A_{\text{макс}}$ амплитуд АС в состоянии разгрузки струй в диапазоне удельной поверхности продукта циклона $S_{\text{уд}} = 1000 - 20000 \text{ см}^2/\text{г}$. В число $A_{\text{макс}}$ вошли АС наибольших значений амплитуд с долей 10 – 15 %.

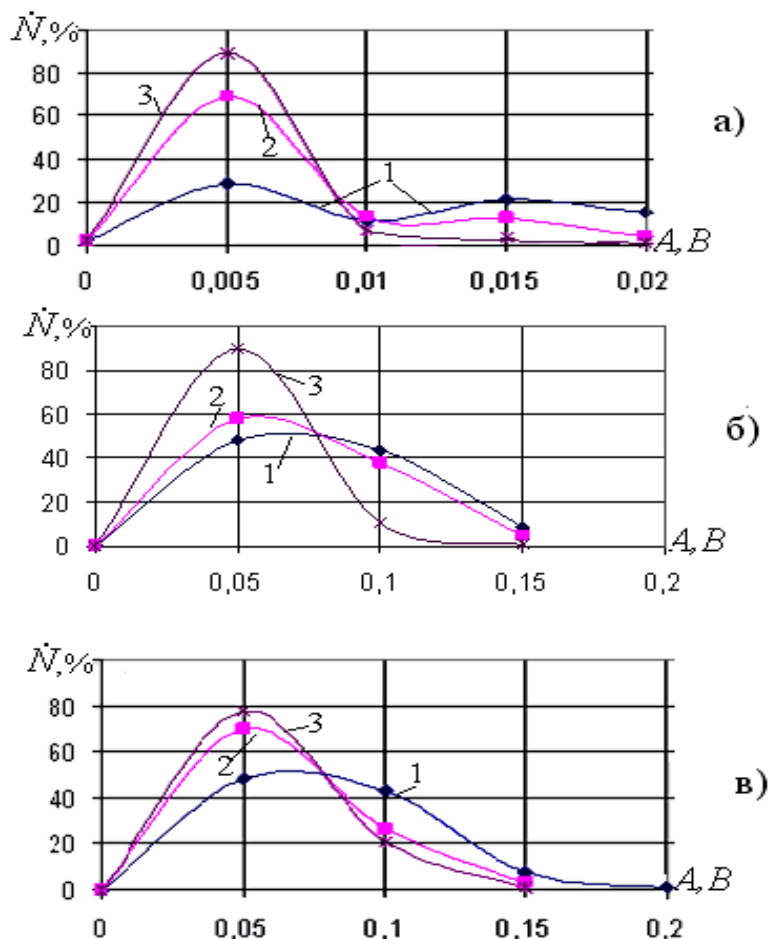


Рис. 3. Распределение акустической активности \dot{N} зоны помола по величине амплитуд на различных стадиях измельчения циркона в установках лабораторного (УСИ-20, УСИ-0,2) и промышленного (УСИ-1000) типоразмера:

- а) УСИ-20 – $S_{\text{уд}} = 2730 \text{ см}^2/\text{г}$, $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,3 \text{ МПа}$,
 - б) УСИ-02 – $S_{\text{уд}} = 5856 \text{ см}^2/\text{г}$, $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,3 \text{ МПа}$,
 - в) УСИ-1000 – $S_{\text{уд}} = 2375 \text{ см}^2/\text{г}$, $n = 180 \text{ мин}^{-1}$, $P = 0,6 \text{ МПа}$;
- 1 – загрузка струй, 2 – рабочий режим, 3 – разгрузка струй

Полагаем, что распределение амплитуд АС на стадии загрузки может служить характеристикой крупности исходного материала, тогда как параметр $A_{\text{макс}}$ на стадии разгрузки струй может служить оценкой характерных размеров частиц циркулирующей нагрузки мельницы (возврата некондици-

онных частиц из классификатора в инжекторы).

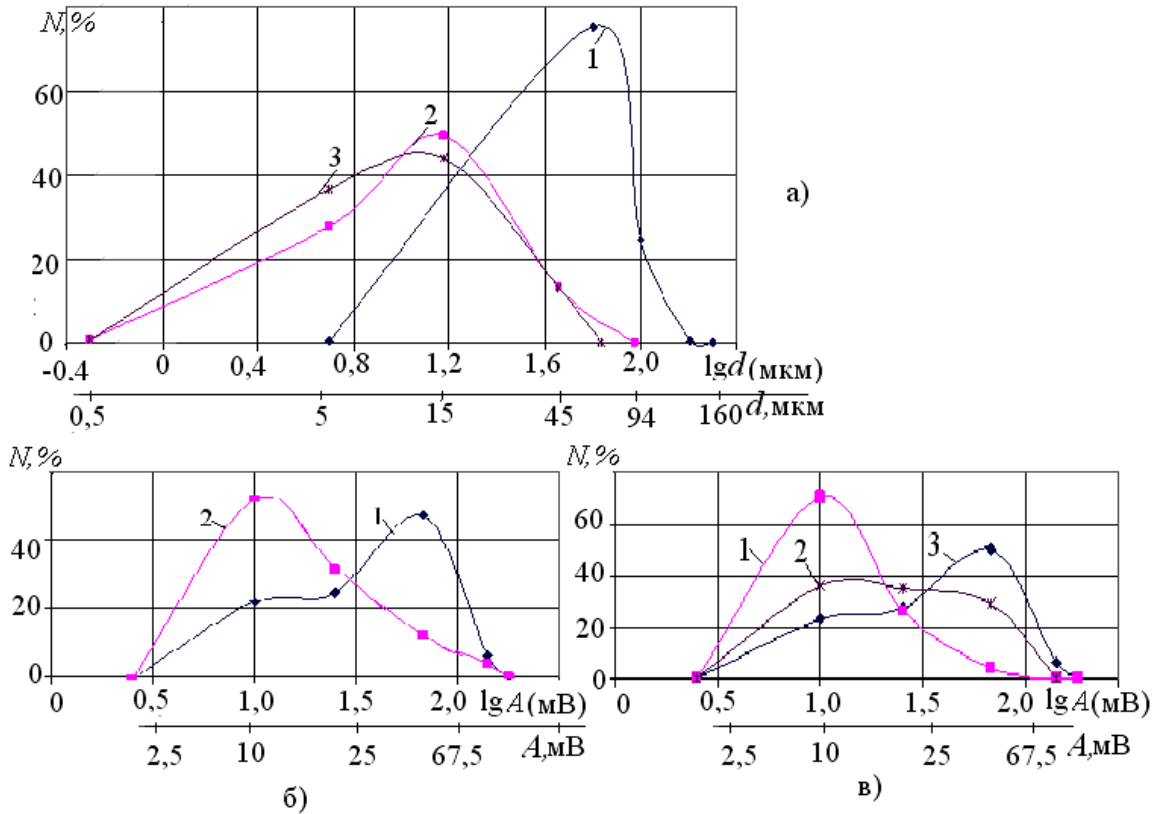


Рис. 4. Гранулометрическое распределение $N = f(\lg d)$ частиц (а) и амплитудные распределения АС зоны помола $N = f(\lg A)$ (б, с) в различных режимах струйного измельчения цирконового концентрата в УСИ-1000:

- а) 1 – исходный материал, 2 – измельченный продукт, $n = 84 \text{ мин}^{-1}$,
 3 – измельченный продукт, $n = 180 \text{ мин}^{-1}$; б) 1 – $n = 84 \text{ мин}^{-1}$, 2 – $n = 180 \text{ мин}^{-1}$;
 с) 1 – $P = 0,3 \text{ МПа}$, 2 – $P = 0,4 \text{ МПа}$, $P = 0,6 \text{ МПа}$, $n = 84 \text{ мин}^{-1}$.

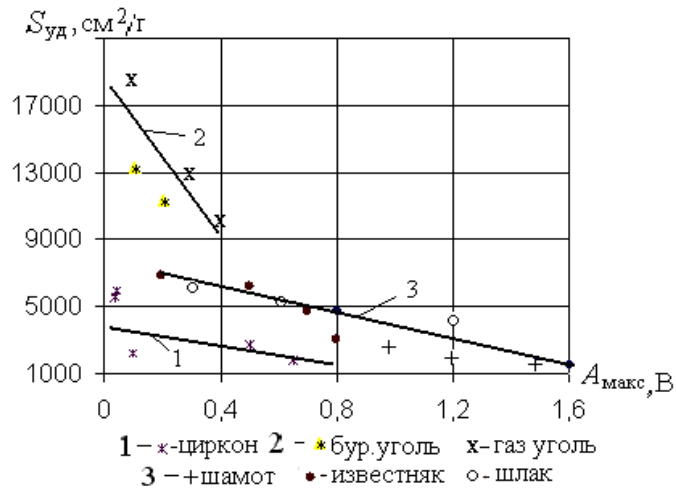


Рис. 5. Изменения максимальных значений $A_{\text{макс}}$ амплитуд АС с повышением дисперсности $S_{\text{уд}}$ измельчаемых частиц (на стадии разгрузки струй)

Выводы.

Применение акустического мониторинга процесса струйного измельчения позволяет получить информацию для прогнозной оценки количества и качества измельченного продукта в условиях измельчительной установки любого типоразмера. В этой связи важны зависимости кинетики акустической активности и распределений амплитуд акустических сигналов в зоне помола. Установленные закономерности акустического мониторинга процесса струйного измельчения могут составить основу информационной акустической диагностики работы струйных мельниц различного типоразмера для поддержания их эффективной работы путем компьютерной обработки акустической информации и управления загрузкой струй материалом.

Список литературы: 1. *Пилов П.И.* Производство тонкодисперсных материалов в установках струйного измельчения / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина и др.] // Тонкоизмельченные и ультрадисперсные материалы в промышленности (производство и применение): 1-я междунар. научн.-практ. конф.: материалы конф. – С-Пб.: "ИВА", 2003. – С. 18 – 22. 2. *Пилов П.И.* Технологические возможности струйных измельчителей / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, И.В. Верхоробина // ГИАБ. – 2007. – № 3. – С. 359 – 367. 3. *Горобец Л.Ж.* Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: автореф. дис... доктора техн. наук: 05.15.08 / Л.Ж. Горобец. – Днепропетровск, 2004. – 36 с. 4. *Пилов П.И.* Анализ функционирования геотехнических систем с позиций закономерностей микроразрушения / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец // Горный журнал. – 2009. – № 5. – С. 29 – 34. 5. *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. 6. *Пилов П.И.* Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки / [П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко и др.] // Вестник НТУ«ХПИ». – 2007. – № 27. – С. 33 – 41. 7. *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. 8. *Pilov P.I.* // Research of acoustic monitoring regularities in a jet grinding process / P.I. Pilov, L.ZH. Gorobets, N.S. Pryadko // Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 54, № 4. – P. 841 – 848. 9. *Pilov P.I.* An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles / P.I. Pilov, L.J. Gorobets, V.N. Bovenko // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 6. – С. 23 – 26. 10. *Горобец Л.Ж.* Характеристики дисперсности продуктов струйного измельчения / [Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, В.П. Краснопер и др.] // ЗКК. – 2010. – № 41 – 42. – С. 111 – 121.

Поступила в редколлегию 17.06.11