

## РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОЙ СТРУЙНОЙ УСТАНОВКИ

Приведены результаты промышленных испытаний системы акустического мониторинга на примере струйного измельчения цирконового концентрата. В различных режимах загрузки струй и классификации измельченного материала определены характеристики и связи акустических и технологических параметров установки.

Наведені результати промислових випробувань системи акустичного моніторингу на прикладі струйного здрибнювання цирконового концентрату. У різних режимах завантаження струменів і класифікації здрибненого матеріалу визначені характеристики й зв'язки акустичних і технологічних параметрів установки.

The results of an industrial test of an acoustic monitoring system are presented using an example of a jet grinding the zirconium concentrate. Under various conditions of jet loading and the grinded material classification characteristics and connections of acoustic and technological parameters of the plant are determined.

**Введение.** В связи с высокой энергоемкостью процесса струйного измельчения в области получения тонкодисперсных порошков (удельной поверхностью более  $0,6 - 1 \text{ м}^2/\text{г}$ ) весьма актуальна проблема поиска и поддержания оптимального режима измельчения в различных режимах загрузки струй измельчаемым материалом [1, 2].

**Постановка проблемы.** В связи со сравнительно высокой энергоемкостью получения тонкодисперсных порошков (размер частиц менее 60 мкм) актуально изучение способов оптимизации процессов тонкого измельчения. Например, возможно применение акустического метода контроля процессов в струйной измельчительной установке для поддержания оптимальной загрузки струй материалом [1 – 3].

Исследования показали, что акустические параметры зоны помола, такие как счет  $\dot{N}$  акустических сигналов (АС) в единицу времени и величина характерной амплитуды ( $A_{cp}$ ,  $A_{max}$ ), изменяются под влиянием степени загрузки струй материалом (перегрузка, недогрузка, рабочий режим), а также с изменением частоты вращения ротора классификатора и давления энергоносителя. Показано, что акустические характеристики газозвеси измельченного продукта в воздуховоде на выходе классификатора также изменяются в зависимости от режима классификации.

Исследование рабочего процесса лабораторной струйной установки типоразмера УСИ-20 (производительностью до 20 кг/ч) позволяет считать наиболее важным параметром «акустического образа» струйной технологии измельчения уровень акустической активности  $\dot{N}$  в зоне помола при условии исключения из числа измеряемых АС фонового шума струй (без подачи материала):  $\dot{N} = (N_{\Sigma} - N_x) / \tau$ . При этом счет АС со значениями амплитуд порядка минимальных ( $A \approx 10 - 20 \text{ мВ}$ ) с долей выше 70 % и максимальных ( $A > 0,6 - 0,7 \text{ В}$ ) с долей 10 ÷ 15 % позволяет контролировать эффект роста дисперсности измельчаемых частиц в процессе измельчения при удельной поверхности  $S_{уд}$  порошков до  $2 \text{ м}^2/\text{г}$  [4, 5].

В данной работе одной из основных задач промышленного опробования акустического мониторинга струйного измельчения цирконового концентрата была корректировка выводов по результатам лабораторных исследований акустических характеристик этого процесса.

© П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, И.В. Верхоробина, П.А. Бакум, 2011

Акустическую активность исследуемых зон противоточной струйной установки промышленного типоразмера (производительность – до 1 т/ч) измеряли с помощью широкополосных пьезокерамических датчиков, соединенных с латунным волноводом, установленным внутри помольной камеры и на выходе из классификатора. Запись и дальнейшая обработка сигналов осуществлялась посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП), соединенного с персональным компьютером.

На рис. 1 показана установка акустической аппаратуры на промышленной струйной мельнице, работающей в условиях Вольногорского горно-металлургического комбината.

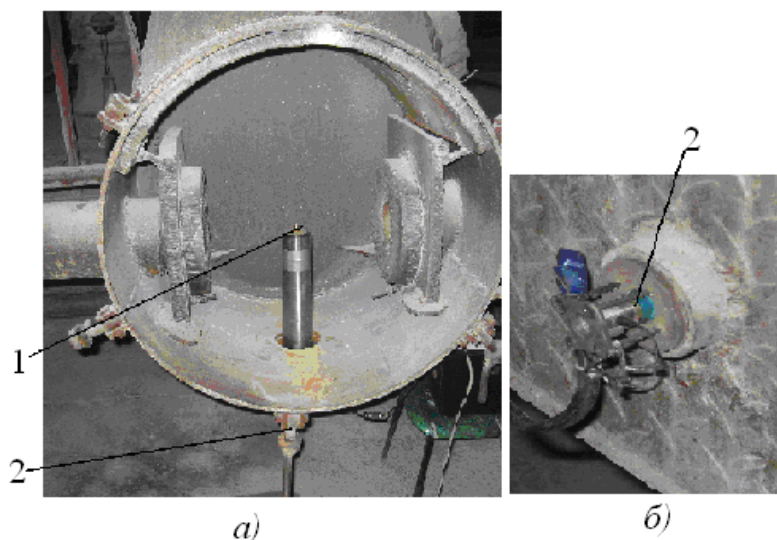


Рис. 1

Акустические датчики установлены в помольной камере (а) и на выходе классификатора (б): 1 – волновод, 2 – датчик.

**Целью исследования** было изучение кинетики акустической активности  $\dot{N}$  и амплитудного распределения акустических сигналов в рабочем режиме при различных значениях давления энергоносителя (в диапазоне от 0,3 до 0,6 МПа) и в зависимости от режима классификации ( $n = 84$  и  $n = 180$  мин<sup>-1</sup>, где  $n$  – число оборотов классификатора).

Аналогичные исследования проводились на лабораторной мельнице УСИ-20 производительностью до 20 кг/час. В таблице 1 сопоставлены значения величины активности сигналов при измельчении циркона на УСИ-20 и на промышленной мельнице (ПСМ) при сохранении постоянного значения давления энергоносителя  $P$  и различных режимах классификации  $n$ , производительности мельницы  $Q$ , и удельной производительности  $q = Q/S_{сеч}$ , где  $S_{сеч}$  – площадь разгонной трубки, через которую поступает энергоноситель в помольную камеру.

Таблица 1

Типоразмер	$P$ , МПа	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$Q$ , г/с	$q$ , г/с	$S_{y\partial}$ , м <sup>2</sup> /г	$\dot{N} \cdot 10^5$
УСИ 20	0.3	600	7.11	2.26	2163	0.83
УСИ-20	0.3	2000	4.1	1.3	5518	0.91
ПСМ	0.6	84	277.78	4.37	1515	0.9
ПСМ	0.6	180	167.7	2.64	2376	0.92

Измельчению подвергался цирконовый концентрат исходной крупностью менее 0,16 мм. На всех стадиях загрузки струй материалом регистрировали уровень акустической активности  $\dot{N}$  и значения амплитуд (средних  $A_{ср}$  и максимальных  $A_{мах}$ ) акустических сигналов. Загрузка струй исходным материалом проводилась непрерывно, однако ее уровень регулировался в ходе эксперимента. Условия и результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Условия и результаты опробования акустического мониторинга

$t$ , мин	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$P$ , МПа	$S_{y\partial}$ , см <sup>2</sup> /г	$Q$ , кг/ч	$R60$ , $R40$ , %	$K$ загр	$A_{мах}$ , мВ	$A_{ср}$ , мВ	$\dot{N} \cdot 10^5$ , с	Режимы
0	86	0,6	708				40	35	1,3	Загрузка
28	84	0,6		960		>1	200	65	0,67	Перегрузка
45	84	0,6	1515		2,3	1	190	75	0,96	Рабочий
69	84	0,6		1020		0,5	165	90	0,87	Рабочий
85	84	0,6		1100	2,0	0,5	185	100	0,9	Рабочий
		0,6	1430		3,2	<0,5	155	80	0,85	Недогрузка
95	84	0,5 0,4 0,3				1	130 50 10	70 20 5	0,94 0,92 0,9	Изменение $P$
102	180	0,6	2376	600	1,0	1	180	105	0,92	Рабочий
130	200	0,6			0,8	<0,5	170	97	0,82	Недогрузка
131		0,5 0,4 0,3				1	120 40 10	65 10 5	0,9 0,85 0,73	Изменение $P$

При  $n = 84 - 86$  мин<sup>-1</sup> крупность продукта контролировали остатком продукта R60 на сите 60 мкм, при  $n = 180 - 200$  мин<sup>-1</sup> – остатком продукта R40 на сите 40 мкм.

Из таблицы видно, что в режиме работы мельницы с рациональной загрузкой измельчаемого материала (коэффициент загрузки  $K = 0,5 - 1$ ) активность акустического излучения зоны помола промышленной мельницы составляет  $\dot{N} = (0,9 - 0,96) \cdot 10^5$  с<sup>-1</sup>, производительность  $Q = 1,02 - 1,1$  т/ч ( $P = 0,6$  МПа,  $n = 84$  мин<sup>-1</sup>).

**Основные результаты исследований.** В таблице 1 акустическая активность сопоставлена с производительностью при измельчении циркона в лабораторной мельнице УСИ-20 и в промышленной мельнице. Анализ показывает, что значения  $\dot{N}$  для обоих типоразмеров мельниц близки по порядку величины. Расчеты удельной производительности мельниц на единицу площади сечения струи составили: для УСИ 20  $q_{y\partial} = 1,3 - 2,26 \frac{\Gamma}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$  (площадь сечения струи  $S = 0,8$  см<sup>2</sup>), для промышленной –  $q_{y\partial} = 2,64 - 4,37 \frac{\Gamma}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$  ( $S = 60$

см<sup>2</sup>). Различие этих величин можно объяснить положительным действием более высокого начального давления ( $P = 0,6$  МПа) энергоносителя на величину скорости струи, что способствовало росту удельной производительности промышленной мельницы. Лабораторные испытания были проведены при  $P = 0,3$  МПа.

На рис. 2 иллюстрируется влияние частоты  $n$  вращения ротора классификатора типа КОВ на активность и амплитуду АС:  $\dot{N} = f(\lg A)$ . Видно, что при более высокой частоте  $n$ , обеспечивающей повышение дисперсности готового продукта, наблюдается увеличение доли АС малых амплитуд (порядка десятка мВ).

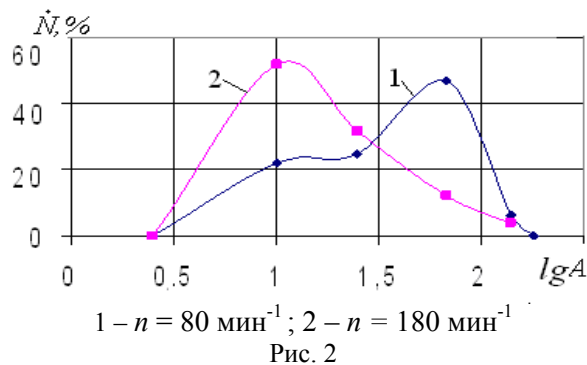


Рис. 2

На рис. 3 показан характер изменения амплитудных характеристик АС под влиянием давления  $P$  холодного сжатого воздуха – энергоносителя струй. Приведены данные для трех значений величины давления  $P$ : 1 – 0,3 МПа, 2 – 0,4 МПа, 3 – 0,6 МПа.

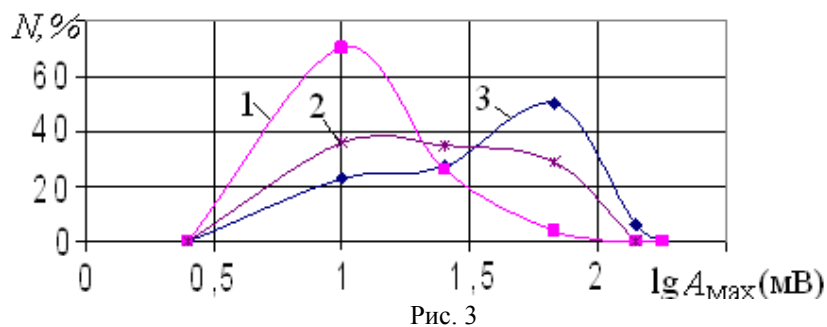
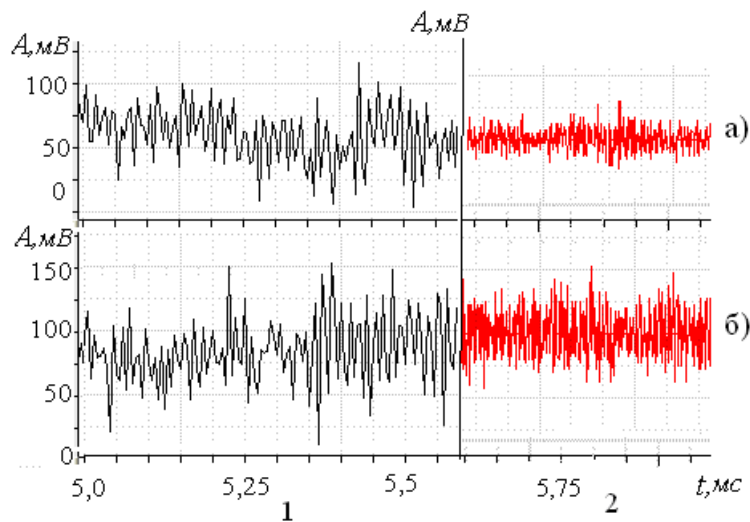


Рис. 3

Как видно из графиков, увеличение скорости истечения струи из сопла при больших значениях  $P$  обуславливает рост счета  $N$  АС с максимальными значениями амплитуд, связанный с увеличением скорости частиц при соударениях с волноводом.

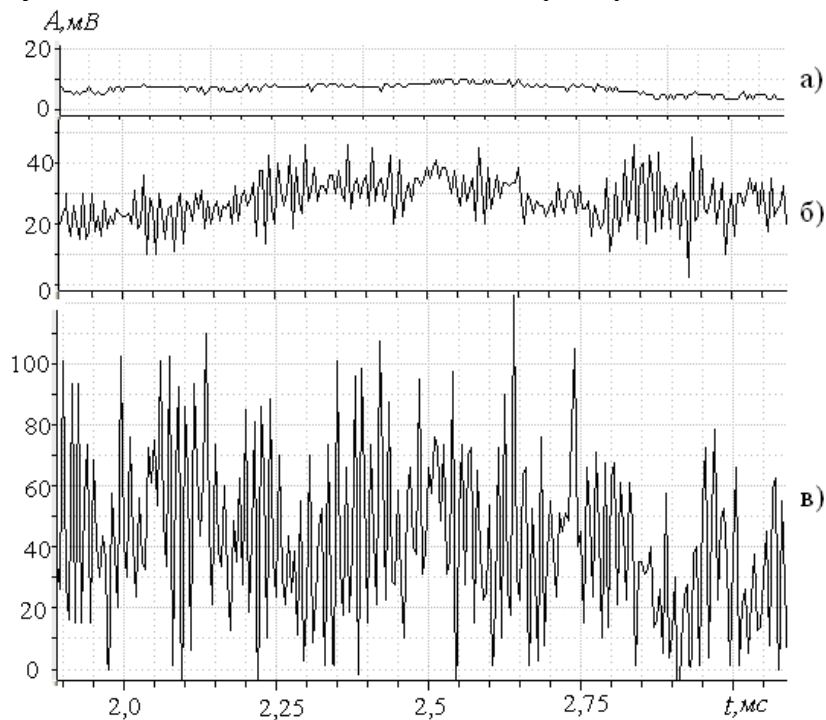
На рис. 4 и 5 показаны записи во времени (порядка 1 мс) акустических сигналов зоны помола в условиях различной частоты  $n$  вращения ротора классификатора (1: а –  $n = 180$  мин<sup>-1</sup>,  $A_{ср} \approx 45$  мВ; б –  $n = 80$  мин<sup>-1</sup>,  $A_{ср} \approx 65$  мВ; 2: а –  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>), и начального давления  $P$  энергоносителя промышленной (1) и лабораторной (2) струйных мельниц.



1 – а)  $n = 180 \text{ мин}^{-1}$ ,  $A_{cp} \approx 45 \text{ мВ}$ ; б)  $n = 80 \text{ мин}^{-1}$ ,  $A_{cp} \approx 65 \text{ мВ}$ ;  
 2 – а)  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $A_{cp} \approx 15 \text{ мВ}$ ; б)  $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ,  $A_{cp} \approx 35 \text{ мВ}$ .

Рис. 4

Из рис. 4 видно, что увеличение частоты вращения ротора классификатора сопровождается естественным уменьшением преимущественных значений амплитуд АС в зоне помола независимо от типоразмера мельницы.



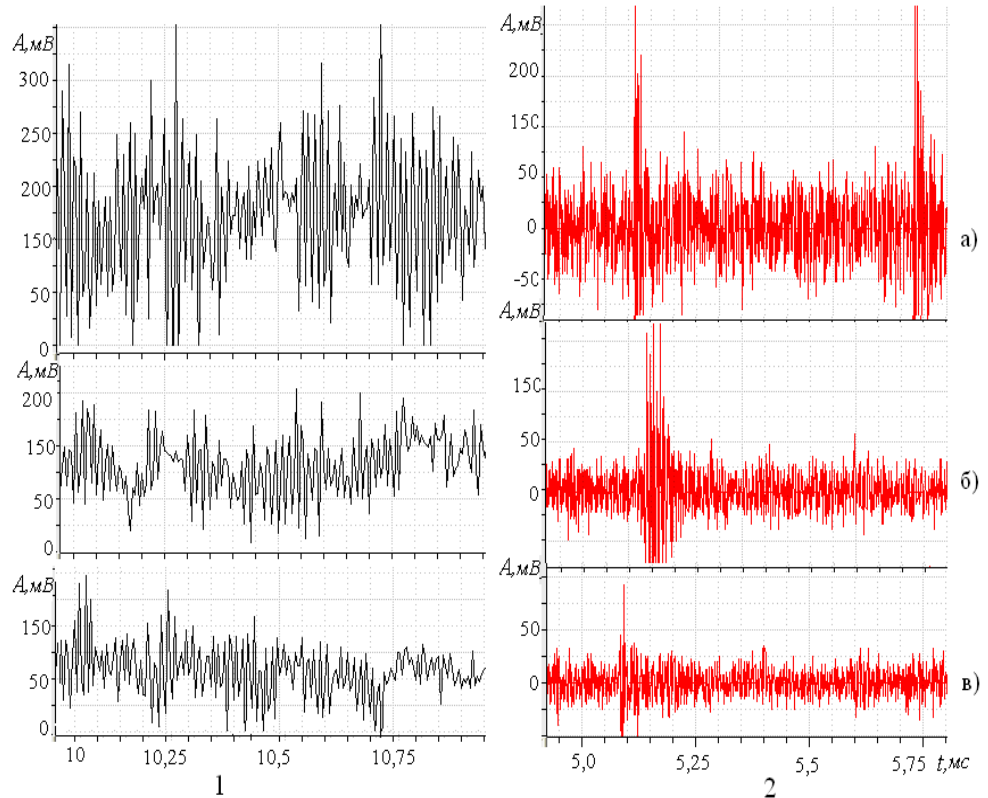
а –  $P = 0,3 \text{ МПа}$ ,  $A_{cp} \approx 5 \text{ мВ}$ ; б –  $P = 0,4 \text{ МПа}$ ,  $A_{cp} \approx 20 \text{ мВ}$ ;  
 в –  $P = 0,6 \text{ МПа}$ ,  $A_{cp} \approx 70 \text{ мВ}$ .

Рис. 5

Изменение амплитудных спектров АС на рис. 5 позволяет наблюдать снижение эффективности струйного измельчения цирконового концентрата с падением давления холодного энергоносителя от 0,6 до 0,3 МПа: амплитуда

АС уменьшается на порядок, что указывает на большую вероятность низкоскоростных и недостаточно эффективных соударений частиц.

Рис. 6 характеризует кинетику амплитуд АС зон помола промышленной (1) и лабораторной (2) мельниц для различных состояний загрузки струй материалом: а) начало загрузки материалом, б) рабочий режим и в) разгрузка струй.



1 – промышленная установка:  $P = 0,6$  МПа,  $n = 80$  мин<sup>-1</sup>,  $S_{y0} = 1515$  см<sup>2</sup>/г;  
2 – лабораторная установка:  $P = 0,3$  МПа,  $n = 600$  мин<sup>-1</sup>,  $S_{y0} = 2163$  см<sup>2</sup>/г.

Рис. 6

В ходе мониторинга работы промышленной мельницы были зафиксированы пьезодатчиком случаи выброса из классификатора частиц некондиционной фракции (более 60 мкм).

На рис. 7 показан момент появления амплитуд акустических сигналов на выходе из классификатора, значительно превышающих текущую контрольную величину амплитуды, что связано с содержанием в газовой взвеси более крупных частиц. Ситовый анализ измельченного продукта подтвердил факт увеличения остатка на контрольном сите, что показало целесообразность своевременного изменения в этом случае частоты  $n$  от 180 до 200 мин<sup>-1</sup> во избежание накопления бракованного продукта.

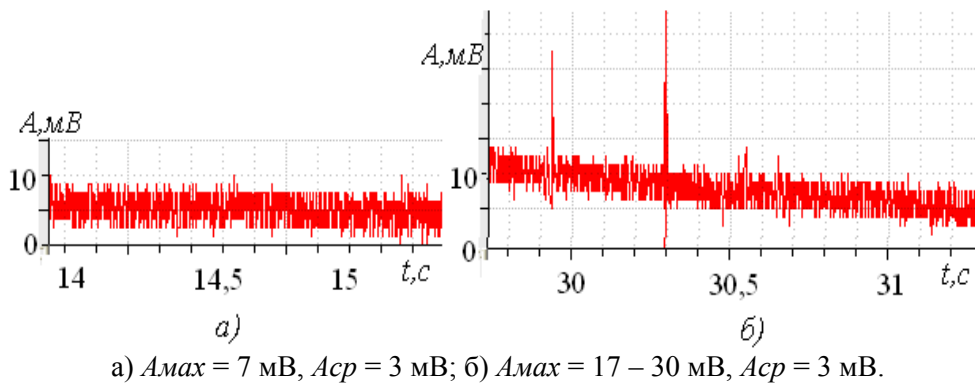


Рис. 7

Для измерения счета и значений амплитуд акустических сигналов волновод был установлен в центре помольной камеры промышленной мельницы. В ходе опробования акустического мониторинга было измельчено порядка двух тонн материала в течение 2,1 часа.

На рис. 8 показан значительный износ волновода (1) ( $\approx 2 \text{ см}$ ). Рис. 8 а) – волновод до измельчения, рис. 8, б) – после измельчения 2 т материала.

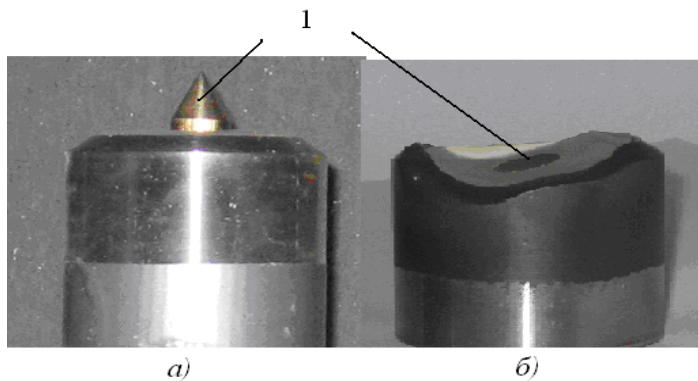


Рис. 8

Это указывает на необходимость некоторого удаления волновода из зоны его интенсивного износа и проверки влияния нового местоположения на акустические характеристики зоны помола.

Проведенное опробование показало также, что необходимо увеличить число измерений текущей производительности  $Q$  мельницы для установления статистических показателей и дальнейшего анализа связи  $Q$  с акустическими параметрами.

**Выводы.** Исследования показали перспективность применения акустического мониторинга в промышленных условиях для решения задач оптимизации процесса струйного измельчения. Направлениями дальнейших испытаний могут быть:

- создание информационной системы контроля акустических параметров промышленной струйной мельницы;
- обоснование критериев поиска и поддержания оптимальной работы мельницы;

– разработка алгоритма и программы компьютерной обработки данных акустического мониторинга для регулирования загрузки струй материалом и частоты вращения ротора классификатора с целью поддержания кондиционной дисперсности готового продукта.

1. Параметры акустического излучения промышленной газоструйной установки / П. И. Пилов, В. Н. Бовенко, Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. В. Верхоробина, А. Е. Щербаков // Вестник НТУ «ХПИ». – 2007. – № 27. – С. 33 – 41.
2. 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.
3. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – № 4. – С. 115 – 121.
4. О повышении эффективности процесса струйного измельчения с использованием акустического мониторинга / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко, И. В. Верхоробина // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 25. – С. 74 – 82.
5. Характеристики дисперсности продуктов струйного измельчения / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, В. П. Краснопер, Л. А. Цыбулько, П. А. Бакум // Збагачення корисних копалин. – 2010. – № 41 – 42 (81). – С. 110-121.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 15.04.11,  
в окончательном варианте 12.05.11