УДК 622.776

Н.С. Прядко /д.т.н./,
К.В. Тернова /к.т.н./,
Л.В. Музика

Інститут технічної механіки Національної
академії наук України і Державного
космічного агентства України, м. Дніпро,
Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТРУМИННОГО ПОДРІБНЕННЯ НА ОСНОВІ АКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ

N.S. Pryadko /Dr. Sci. (Tech.),
K.V. Ternova /Cand. Sci. (Tech.),
L.V. Muzyka

Institute of Technical Mechanics of
the National Academy of Sciences and
the Space State Agency of Ukraine, Dnipro,
Ukraine

IMPROVING THE EFFICIENCY OF JET GRINDING BASED ON ACOUSTIC MONITORING OF THE PROCESS

Мета. Метою роботи є розробка шляхів підвищення ефективності струминного подрібнення на основі встановлення зв'язку продуктивності млина та якості продукту з характеристиками акустичних сигналів.

Методика. Оптимізація процесу струминного подрібнення виконувалась з використанням аналізу акустичних сигналів робочих зон струминного млина. Для побудови залежностей технологічних і акустичних параметрів було використано статистичний аналіз експериментальних даних.

Результати. Дослідження підтвердили залежність параметрів акустичних сигналів робочих зон від режиму подрібнення. Встановлено, що зміни максимальної і середньої амплітуди акустичних сигналів робочої зони в процесі подрібнення мають чітко виражений коливальний характер, що пов'язано зі зміною циркуляційного навантаження в робочій зоні. Показано, що відносна продуктивність млина, нормована рівнем завантаження камери подрібнення, змінюється в процесі подрібнення за квадратичним законом. В той же час, зміна максимальної і середньої амплітуди акустичних сигналів робочої зони в процесі подрібнення описується поліномом 4 порядку, при цьому величина середньої амплітуди акустичних сигналів робочої зони подрібнення в сталому режимі процесу є квадратичною функцією від відносної продуктивності за рівнем завантаження. Показано, що амплітуда акустичних сигналів характерної частоти, записаних в зоні за класифікатором, прямо пропорційна крупності часток готового продукту, що транспортується.

Наукова новизна. Вперше науково обґрунтовано і експериментально підтверджено, що продуктивність струминного млина за рівнем завантаження матеріалом змінюється в процесі подрібнення за квадратичним законом. А залежність амплітуд акустичних сигналів зони подрібнення від відносної продуктивності носить поліноміальний характер.

Практична цінність. Встановлення нових залежностей характеристик акустичних сигналів від технологічних параметрів дозволить підвищити ефективність струминного подрібнення на основі результатів акустичного моніторингу. Контроль продуктивності млина та якості продукції за величиною середньої амплітуди акустичних сигналів в робочих зонах установки дасть змогу знизити витрати енергії в технологічних процесах подрібнення для одержання тонкого і надтонкого матеріалу.

Ключові слова: струминне подрібнення, продуктивність, акустичні сигнали, амплітуда, ефективність, якість продукту.

DOI: 10.34185/0543-5749.2019-5-6-18-26

Постановка проблеми. Зниження енергоспоживання при подрібненні корисних копалин завжди було актуальним завданням, оскільки цей процес капіталомісткий, енергоємний і має суттєвий вплив на собівартість продукції збагачувальних фабрик. Технологічним завданням подрібнення на збагачувальних фабриках є розкриття мінералів тонко вкраплених руд. Розкриття повинно здійснюватися при мінімальному переподрібненні вкраплень [1].

На переподрібненні додатково витрачається енергія, а тонко дисперсні частинки, що утворилися, погіршують умови сепарації мінералів, що призводить до втрат корисного компонента. Для зниження впливу зазначених факторів у промисловості використовують технології подрібнення в замкнутих циклах [2 – 3].

Подрібнення матеріалу в струминному млині відбувається в помольній камері, в яку подають матеріал в струменях стисненого повітря або перегрітої пари. Типові швидкості потоків енергоносія (повітря) в струминних млинах становлять 300 – 500 м/с, в парових млинах швидкість потоку вище. З бункеру матеріал завантажується в змішувальний об'єм, втягується в потік, прискорюється в розгінних трубках до швидкості потоку і виноситься в помольну камеру, де відбувається зіткнення двофазних струменів і подрібнення матеріалу. Далі матеріал надходить в класифікатор, де відбувається його поділ на готовий продукт необхідної крупності і недоподрібнений матеріал, що повертається знову на подрібнення. Так працює технологічна схема струминного подрібнення в замкнутому циклі.

Перевага тонкого струминного подрібнення

в тому, що практично повністю виключається привніс домішок у порошки. За рахунок високої динамічності процесу подрібнення часток у надзвукових струменях енергоносія досягається висока питома поверхня подрібнених продуктів. Однак цей процес доволі енергоємний. Для контролю тонкого подрібнення використовуються радіометричні, акустичні методи [4]. Для підвищення ефективності струминного подрібнення новий підхід – акустичний моніторинг процесу [5].

Мета роботи – розробка шляхів підвищення ефективності струминного подрібнення встановленням зв'язку продуктивності млина, якості продуктів подрібнення і характеристик акустичних сигналів.

Методика досліджень. Для встановлення залежності продуктивності процесу подрібнення від завантаження матеріалом і зв'язку акустичних сигналів робочих зон млина з цими технологічними параметрами проведено подрібнення шамоту в трьох варіантах завантаження з записом акустичних сигналів. Дослідження проводились на експериментальній базі ІТМ НАНУ і ДКАУ, зокрема на лабораторному струминному млині УСІ-20 з продуктивністю до 20 кг/год [6].

Основний матеріал дослідження. Розглядалися режими подрібнення з одноразовим завантаженням (1 кг), режим безперервного завантаження, що привело до перевантаження млина та оптимальний режим, коли завантаження рівних порцій проводилось за акустичними сигналами, що фіксувались у робочій зоні подрібнення млина. На рис. 1 показано залежність продуктивності млина від режиму завантаження.

Рис. 1. Залежність продуктивності Q млина від режиму завантаження при подрібненні шамоту: 1 – оптимальний режим дискретного завантаження; 2 – режим з перевантаженням млина; 3 – режим одноразового завантаження

Встановлено, що найбільша ефективність процесу подрібнення, щодо продуктивності млина, досягається при дискретному завантаженні рівними порціями матеріалу згідно контролю за акустичними сигналами.

Важливу роль при аналізі продуктивності млина, що працює в замкнутому циклі, відіграє циркуляційне навантаження, особливо це проявляється при дискретному завантаженні матеріалу. Саме через цей факт вивчалась поведін-

ка величини відносної продуктивності млина до рівня завантаження камери подрібнення Q/G . Рівень завантаження робочої зони млина визначається у долях одиниці, тобто він міг змінюватись від 1 при початку максимального завантаження до 0 при розвантаженні млина. На лабораторному млині УСІ-20 цей рівень визначався візуально через спеціальні прозорі вікна. Результати експериментів показані в таблиці 1.

Таблиця 1. Значення технологічних і акустичних параметрів при дискретному завантаженні млина

t , хв	Q , кг/год	G , відн. од	Q/G , кг/год	A_{max} , В	A_{cp} , В
1		1		8	
2	9		9	6	1,8
2,4		0,5		7	
4	6,24		12,48	4,5	1,5
4,8		0,7		7	
6	12,45		17,79	4	1,3
6,8		0,5		6,5	
8	12,9		25,8	3,4	1
8,4		0,5		6,5	
9,6				4,2	
10	15	0,7	21,43	3,6	1,2
10,8		0,5		7	
11,2				6,4	
12	11,4		22,8	4	1,5
13,2		0,5		6,8	
14	3,9		13	3	0,8

При експериментальних дослідженнях процесу подрібнення різних матеріалів встановлено, що відносна продуктивність млина, нормована рівнем завантаження камери подрібнення, змінюється в процесі подрібнення за квадратичним законом, коефіцієнти квадратичної залежності залежать від властивостей матеріалу і те-

хнологічних параметрів процесу. Так, для подрібнення шамоту при технологічних параметрах

$$P = 0,3 \text{ МПа}, n = 600 \text{ с}^{-1}$$

ця залежність має вигляд (див. рис. 2)

$$Q/G = -0,33t^2 + 5,93t - 3,55; \quad R = 0,92. \quad (1)$$

Рис. 2. Зміна відносної продуктивності при дискретному завантаженні

Акустичний моніторинг проводився за допомогою апаратної бази, описаної в [7]. Для реєстрації акустичних сигналів, що виникають при подрібненні, хвилеводи встановлювалися в двох зонах – всередині помольної камери і на виході з класифікатора. Система запису і обробки АС включала: латунні хвилеводи, сполучені з п'єзо-керамічними датчиками, аналого-цифровий перетворювач, з'єднаний з комп'ютером. Розроблена апаратна частина виконувала три функції: фіксування акустичних сигналів, перетворення їх в цифрову форму і передачу даних в комп'ютер.

Технологія аналізу акустичних сигналів [8] складалась у наступному. У число досліджуваних технологічних параметрів внесено початковий тиск стисненого повітря (перед закінченням з сопла), частота обертання ротора класифікатора, ступінь завантаження струменів матеріалом,

яка характеризується чотирма режимами: завантаженням струменів матеріалом, робочим режимом подрібнення, розвантаженням зони подрібнення і перевантаженням струменів матеріалом. Найбільш інформативними параметрами акустичного моніторингу є середня і максимальна амплітуда АС, її розподіл за величиною і частота сигналів зі згаданими амплітудами.

Для подрібнення шамоту, продуктивність процесу якого розглядалась вище, зміна величини максимальної та середньої амплітуди акустичних сигналів зони подрібнення показана на рис. 3. Побудовані залежності мають подібний характер і являють собою поліноми 4 порядку, наприклад:

$$A_{cp} = -0,001 \cdot t^4 + 0,032 \cdot t^3 - 0,305 \cdot t^2 + 0,958 \cdot t + 0,843; \quad R = 0,977. \quad (2)$$

Рис. 3. Зміна максимальної (а) і середньої (б) амплітуди акустичних сигналів робочої зони в процесі подрібнення

Для виявлення залежності акустичних сигналів від циркуляційного завантаження подрібнювальної установки, проведено акустичний моніторинг всього циклу подрібнення. Встановлено, що зміна максимальної і середньої амплітуди акустичних сигналів робочої зони в процесі подрібнення ($A_{max}(t)$ і $A_{cp}(t)$) мають чітко виражений коливальний характер, що пов'язано зі зміною маси матеріалу в робочій зоні. На рис. 4 показано величини максимальної амплітуди сигналів в перші 8 хвилин процесу з дискретними завантаженнями через кожні 2 хв.

Після встановлення сталого режиму подрібнення при дискретному завантаженні, тобто в представленому випадку після другої хвилини, коливання величини амплітуди відрізняються різким зростанням після завантаження і подальшим спадом до критично малого значення перед черговим завантаженням. Такий характер зміни характеристики сигналів обумовлюється впливом коливань циркуляційного навантаження і дискретним завантаженням нового матеріалу для подрібнення. Саме коливання загального навантаження на робочу зону подрібнення

впливає значною мірою на продуктивність млина, тому важливо здійснити контроль навантаження за допомогою акустичного моніторингу.

Дослідженнями встановлено залежність ве-

личини середньої амплітуди акустичних сигналів робочої зони від продуктивності млина щодо його завантаження $A_{cp} = f(Q/G)$, графік якої представлено на рис. 5, а.

Рис. 4. Вплив циркуляційного навантаження на максимальну амплітуду акустичних сигналів зони подрібнення млина

Рис. 5. Залежність середньої амплітуди сигналів робочої зони від продуктивності млина щодо його завантаження за цілий цикл подрібнення (а) та у сталому режимі (б)

Відмічено, що ця залежність є поліномом 4 порядку, якщо брати до уваги цілий цикл подрібнення, а для сталого режиму залежність є квадратичною функцією виду:

$$A_{cp} = -0,0062 \cdot (Q/G)^2 + 0,2141 \cdot Q/G - 0,4046; \quad R = 0,846. \quad (3)$$

Коефіцієнти залежностей залежать від властивостей матеріалу і технологічних параметрів процесу.

На ефективність роботи млина в значно впливає якість подрібненого матеріалу.

При дослідженні спектрів сигналів, отриманих в ході подрібнення та транспортування різних матеріалів, встановлено [9], що кожній вузькій фракції матеріалу відповідають сигнали з певною характерною частотою з максимальною амплітудою на інформативному діапазоні частот. Деякі результати аналізу представлені на рисунку 6.

Рис. 6. Спектр частот сигналів при транспортуванні та подрібненні матеріалів крупністю 0,4 мм: а) шамоту; б) шлаку; в) кварцу.

Проаналізувавши спектри частот різних матеріалів (кварц, шлак, шамот) з частками різної крупності, отримали характерні частоти для кожної з розглянутих фракцій. При цьому з розглянутого спектра частот сигналів були виключені частоти від 0 до 48 кГц і від 90 кГц і вище, в зв'язку з тим, що дані частоти не несуть інформації про розмір часток, тому що вони характерні для процесу в цілому [10]. В ході досліджень зв'язків крупності матеріалу з акустичними параметрами сигналів отримані амплітуди, відповідні характерним частотам для певного розміру часток. Експериментальні дані зведені в таблиці 2 та на рис. 7.

Встановлено, що для матеріалів різних властивостей але однакової крупності акустичні сигнали при транспортуванні мають однакову характерну частоту, причому амплітуди A_x цих сиг-

налів лінійно залежать від крупності матеріалу. Зокрема, для матеріалів, приведених у таблиці 2, залежність має вигляд:

$$A_x = 10,5 \cdot d + 0,1; \quad R = 0,9.$$

Оскільки при подрібненні в промислових умовах завжди задається необхідний клас крупності готового продукту і допускається лише 1,5 % часток крупніше цього класу, то знаючи характерну частоту акустичних сигналів для часток продукту даної крупності можна контролювати крупність одержаного продукту за значення амплітуди сигналів у зоні транспортування за класифікатором. Таким чином підвищується якість продуктів подрібнення, що є другою необхідною умовою підвищення ефективності процесу.

Таблиця 2. Акустичні параметри сигналів, записані під час транспортування в потоці енергоносія вузьких фракцій сипучих матеріалів

Матеріал	d , мм	F , кГц	A , мВ
Шлак	$-0,315+0,2$	69	2,7
	$-0,4+0,315$	60	5,7
	$-0,63+0,4$	79	6,4
Кварц	$-0,315+0,2$	69	2,4
	$-0,4+0,315$	60	3,5
	$-0,63+0,4$	79	4,2
Шамот	$-0,315+0,2$	69	2,8
	$-0,4+0,315$	60	4,2
	$-0,63+0,4$	79	8,1

Рис. 7. Залежність амплітуди і характерної частоти акустичних сигналів від крупності продуктів подрібнення

Висновки. Проведені дослідження показали залежності характеристик акустичних сигналів робочих зон струминного млина від завантаження камери млина та крупності готового продукту. Показано, що коливальний характер максимальної і середньої амплітуди акустичних сигналів робочої зони в процесі подрібнення залежить від циркуляційного навантаження в робочій зоні.

Встановлено характер зміни відносної продуктивності млина по рівню завантаження камери подрібнення та змін максимальної і середньої амплітуди акустичних сигналів робочої зони в процесі подрібнення. Доведено, що в сталому режимі процесу залежність середньої амплітуди акустичних сигналів робочої зони подрібнення є квадратичною функцією від відносної продуктивності за рівнем завантаження.

Показано, що амплітуда акустичних сигналів характерної частоти, записаних в зоні за класифікатором, прямо пропорційна крупності часток готового продукту, що транспортується.

Враховуючи можливості акустичного моніторингу, описані вище, підвищення ефективності струминного подрібнення можливо на основі комбінованого управління, коли заданий вихід готового класу при максимальній продуктивності забезпечується контролем величини середньої амплітуди акустичних сигналів в зоні подрібнення і в зоні транспортування готового продукту за класифікатором. При досягненні критичних значень контрольованих параметрів здійснюється регулювання завантаження струменів матеріалом, що веде до зміни поточної продуктивності, і регулювання режиму класифікації, що змінює гранулометричний склад готового продукту, тобто покращує його якість.

Бібліографічний список

1. Prziwara P., Hamilton L.D., Breitung-Faes S., Kwade A. Impact of grinding aids and process parameters on dry stirred media milling. *Powder Technology*. Braunschweig, 2018. Vol. 335. P. 114–123.
2. Echeverria C., Pahlevani F., Sahajwalla V. Mechanical particle size reduction methods as potential interfacial optimization alternative for a low-carbon Particulate Reinforced Marine Biocomposite. *Journal of Cleaner Production*. Veena, 2019. Vol. 221. P. 509 – 525.
3. Пилов П. И., Прядко Н. С. Снижение энергопотребления в замкнутых циклах тонкого измельчения руд. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. Днепропетровск, 2013. Вып. 6. С. 75 – 80.
4. Schons D., Kwade A. Determination of the axial grinding media distribution in the IsaMill using radiometric densitometry. *Minerals Engineering*. Braunschweig, 2019. Vol. 130. P. 110–116.
5. Прядко Н. С. Розвиток теорії тонкого подрібнення корисних копалин : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.08. Дніпропетровськ, 2015. 36 с.
6. Muzyka L. V., Pryadko N. S., Ternovaya E. V., Strelnikov H. A., Verhorobina I. V. Acoustic method of jet grinding study and control. *E3S Web of Conferences*. Vol. 109. (09 July 2019). P. 1–11.
7. Прядко Н.С. Акустические исследования струйного измельчения. Saarbrücken Germany, 2013. 172 с.
8. Pryadko N. S. Optimization of fine grinding on the acoustic monitoring basis. *Power Engineering, Control & Information Technologies in Geotechnical Systems*. London 2015. P. 99-108.
9. Терновая Е. В. Анализ частот сигналов

при транспортировании и измельчении сыпучих материалов в потоке. *Збагачення корисних копалин*. 2016. № 63 (104). С. 59 – 65.

10. Тернова К. В. Обґрунтування акустичного контролю дисперсності продуктів подрібнення: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.15.08. Дніпро, 2018. 21 с.

References

1. Prziwara, P., Hamilton, L. D., Breitung-Faes, S., & Kwade, A. (2018). Impact of grinding aids and process parameters on dry stirred media milling. *Powder Technology*, 335, 114 – 123.
2. Echeverria, C., Pahlevani, F., & Sahajwalla, V. (2019). Mechanical particle size reduction methods as potential interfacial optimization alternative for a low-carbon Particulate Reinforced Marine Bio-composite. *Journal of Cleaner Production*, 221, 509-525.
3. Pilov, P. I., & Pryadko, N. S. (2013). Snizhenie energopotrebleniya v zamknytyh tsiklah tonkogo izmelcheniya rud. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, (6), 75-80.
4. Schons, D., & Kwade, A. (2019). Determination of the axial grinding media distribution in the IsaMill using radiometric densitometry. *Minerals Engineering*, 130, 110-116.
5. Pryadko, N. S. (2015). Razvitie teorii tonkogo podribneniya korisnih kopalin. Avtoreferat dis. ... d-ra tehn. nauk: 05.15.08. Dnipropetrovsk.
6. Pryadko, N., Ternova K., Strelnykov H., Muzyka, L., & Verkhobina, I. (2019). Acoustic method of jet grinding study and control. *International Conference Essays of Mining Science and Practice. E3S Web of Conferences*, 109. doi: 10.1051/e3sconf/201910900074.
7. Pryadko, N.S. (2013). Akusticheskie issledovaniya strujnogo izmelcheniya. Saarbrücken, Germany.
8. Pryadko, N. S. (2015). Optimization of fine grinding on the acoustic monitoring basis. *Power Engineering, Control & Information Technologies in Geotechnical Systems*.
9. Ternovaya, E. V. (2016). Analiz chastot signalov pri transportirovanii i izmelchenii sypuchih materialov v potoke. *Zbagachennyya korisnih kopalin*, (63).
10. Ternova, K. V. (2018). Obgruntuvannia akustychnoho kontroliu dyspersnosti produktiv podribnennia: Avtoreferat dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.15.08. Dnipro.

Цель работы. Целью работы является разработка путей повышения эффективности струйного измельчения на основе установления

связи производительности мельницы, качества продуктов измельчения и характеристик акустических сигналов.

Методика. Оптимизация процесса струйного измельчения выполнялась с помощью анализа акустических сигналов рабочих зон струйного мельницы. Для построения зависимостей технологических и акустических параметров использовался статистический анализ экспериментальных данных.

Результаты. Исследования подтвердили зависимость параметров акустических сигналов рабочих зон от режима измельчения. Установлено, что изменения максимальной и средней амплитуды акустических сигналов рабочей зоны в процессе измельчения имеют четко выраженный колебательный характер, что связано с изменением циркуляционной нагрузки в рабочей зоне. Показано, что относительная производительность мельницы, нормированная уровнем загрузки камеры измельчения, меняется в процессе измельчения по квадратичному закону. В то же время, изменение максимальной и средней амплитуды акустических сигналов рабочей зоны в процессе измельчения описывается полиномом 4 порядка, при этом величина средней амплитуды акустических сигналов рабочей зоны измельчения в установившемся режиме процесса является квадратичной функцией от относительной производительности по уровню загрузки. Показано, что амплитуда акустических сигналов характерной частоты, записанных в зоне за классификатором, прямо пропорциональна крупности частиц транспортируемого готового продукта.

Научная новизна. Впервые научно обосновано и экспериментально подтверждено, что производительность струйной мельницы по загрузке исходного материала изменяется в ходе измельчения по квадратичному закону. А зависимость амплитуд акустических сигналов зоны измельчения от относительной производительности имеет полиномиальный характер.

Практическая ценность. Установка новых зависимостей характеристик акустических сигналов от технологических параметров позволит повысить эффективность струйного измельчения на основе результатов акустического мониторинга. Контроль производительности мельницы и качества продукции по величине средней амплитуды акустических сигналов в рабочих зонах установки позволит снизить затраты энергии в технологических про-

цессах измельчения для получения тонкого и сверхтонкого материала.

Ключевые слова: струйное измельчение, производительность, акустические сигналы, амплитуда, эффективность, качество продукта.

Purpose. The purpose of the work was developing ways for improving the jet grinding efficiency by linking mill productivity, quality of grinding products and acoustic signal characteristics.

Methods. Optimization of jet grinding process was realized by using acoustic signals analysis of jet mill operation zones. The statistics analysis of experimental data was used for determination connection of technology and acoustics parameters.

Results. Studies have confirmed the dependence of the acoustic signals of the operating areas on the grinding mode. There have been found that changes in the maximum and average amplitude of the acoustic signals during the grinding process have a clearly oscillatory nature, which is related to the circulating load change in the operation area. It is shown that the relative mill productivity, normalized by the load level of the grinding chamber, changes in the grinding process according to the quadratic law. At the same time, the change of the maximum and average amplitude of the acous-

tic signals during the grinding process is described by a polynomial of 4-th order, within the magnitude of the average amplitude of the acoustic signals in the steady process mode is a quadratic function of the relative productivity by load level. It is shown that the acoustic signal amplitude of the characteristic frequency recorded in the classifier zone is directly proportional to the particle size of the ready transported product.

Originality. For the first time, it has been scientifically substantiated and experimentally confirmed that the productivity of a jet mill by the initial material feeding changes during grinding according to the quadratic law. And the dependence of the acoustic signal amplitudes of the grinding zone on the relative productivity is polynomial.

Practical implications. Establishing new dependencies of acoustic signal characteristics on technological parameters allows increasing the jet grinding efficiency based on the results of acoustic monitoring. The control of mill productivity and product quality by the average amplitude of the acoustic signals in the operation zones of the installation make it possible to reduce energy consumption in the technological grinding processes of obtaining a thin and ultra-thin material.

Keywords: jet grinding, productivity, acoustic signals, amplitude, efficiency, product quality.

Рукопис надійшов 05.11.2019