

solution of the problem of the interaction of wave fronts behind coupling has been made possible, it has been possible to establish a criterion for the optimal location of the point of registration of the parameters of the shock wave. The regularities of the change in the parameters of a shock air wave during its propagation through channel conjugation are established.

**Practical implications.** The obtained tables of coefficients of the air-blast airflow into the conjugation allow me to update and improve the technique for calculating the parameters of shock waves in the regulatory documents of the construction industry and the mining industry.

**Keywords:** *shock air waves, underground structures, channel conjugation, leakage coefficient, numerical experiment, coefficient table.*

УДК 621.926

© Н.С. Прядко, Л.В. Музыка, Е.В. Терновая

## **РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ СТРУЙНОЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С АКУСТИЧЕСКИМ МОНИТОРИНГОМ**

© N. Pryadko, L. Muzyka, E. Ternova

## **REGRESSION ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL RESULTS OF THE JET MILL OPERATION WITH ACOUSTIC MONITORING**

**Цель** - построение на основании полученных экспериментальных результатов регрессионной модели струйного измельчения материала и выявление влияния основных параметров процесса на эффективность измельчения.

**Методика.** На основании полученных экспериментальных результатов измельчения шамота лабораторной газоструйной измельчительной установкой с акустическим мониторингом процесса построена регрессионная модель струйного измельчения с использованием прикладного пакета обработки статистических данных Statgraphics Plus. Проведено кодирование факторов и построено план-матрица экспериментов. Построены трехмерные графики зависимости производительности от факторов и Парето-график для функции отклика, показывающий взаимное влияние факторов.

**Результаты.** Исследованы основные факторы, влияющие на эффективность струйного измельчения материалов. Установлено преобладающее влияние степени загрузки помольной камеры на ее производительность. Использован новый подход для контроля производительности измельчения. На базе применения результатов акустического мониторинга для анализа режимов и дисперсности продуктов измельчения показана зависимость амплитуды акустических сигналов зоны измельчения от технологических параметров процесса, что подтверждает установленные ранее связи характеристик акустических сигналов рабочих зон мельницы с технологическими параметрами измельчения. Необходимо уточнить возможность разработки системы контроля качества продуктов измельчения на основе анализа характеристик записанных сигналов акустического мониторинга процесса

**Научная новизна.** Полученные регрессионные зависимости влияния каждого принятого фактора на производительность струйной мельницы и на характеристики сигналов акустического мониторинга адекватно описывают процесс измельчения и могут быть использованы для повышения его эффективности.

**Практическая ценность.** Результаты исследования являются базой для разработки автоматической системы управления работой струйной измельчительной установки.

**Ключевые слова:** струйное измельчение, производительность, фактор, акустический сигнал, амплитуда, регрессионный анализ, влияние.

**Постановка проблемы.** В последние годы для производства тонкодисперсных порошков широкое распространение получили мельницы интенсивного действия с высокой скоростью нагружения. К таким измельчителям, в частности, относятся газоструйные противоточные мельницы, работающие в замкнутом цикле с классификаторами разного типа. К положительным сторонам процесса измельчения сыпучих материалов в струях энергоносителя следует отнести относительно небольшую металлоемкость мельниц и возможность получать «чистый» продукт, т.е. без внесения посторонних добавок от износа мелющих тел или футеровки.

Более интенсивному внедрению струйного измельчения в производственные процессы мешает его достаточно высокая энергоемкость. Поэтому совершенствование струйных измельчителей в направлении повышения производительности и, соответственно, снижения энергоемкости процесса является актуальной задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** Исследованиям тонкого измельчения посвящены работы многих ученых: В.И. Акунова, А.И. Загустина, В.В. Товарова, В.А. Перова, С.Е. Андреева, В.В. Зверевича, К.А. Разумова, А. Линча, Г.С. Ходакова, О.Н. Тихонова, В.И. Кармазина, П.И. Пилова, Л.Ж. Горобец. Вопросы эффективности работы измельчительных агрегатов рассмотрены в трудах Б.А. Арефьева, В.З. Козина, Я.Е. Гельфанда, С.Ф. Шинкоренко, А.Н. Марюты, В.И. Горобец. В работах [1, 2] установлены зависимости производительности струйной мельницы от давления и температуры энергоносителя, крупности получаемого продукта. Управление процессом [3] проводилось на базе анализа расходно-напорных характеристик пневмотранспортной сети или давлению в камере измельчения. Однако в этих случаях время запаздывания было слишком большим и максимума производительности не удавалось удерживать.

Новый подход к анализу процесса тонкого измельчения был предложен в работах [4-7]. Он основан на применении акустического мониторинга для анализа режимов и дисперсности продуктов измельчения. Показано, что величина амплитуды акустических сигналов зоны измельчения зависит от режимов измельчения, в частности, от степени загрузки камеры мельницы. Крупность продуктов измельчения и транспортирования за классификатором связаны с дисперсией характерной частоты сигналов акустического мониторинга [7]. Основываясь на экспериментальных исследованиях, можно отнести характеристики сигналов акустического мониторинга к параметрам модели струйного измель-

чения, указывающих на эффективность процесса, т.е. производительность мельницы и дисперсность продукта измельчения.

**Целью работы** является построение на основании полученных экспериментальных результатов регрессионной модели струйного измельчения материала и выявление влияния основных параметров процесса на эффективность измельчения.

**Изложение основного материала.** Для построения регрессионной модели процесса измельчения необходимо установить факторы, влияющие на производительность процесса, и показать зависимость амплитуды акустических сигналов зоны измельчения от производительности мельницы и выбранных факторов.

**Факторы влияния на производительность мельницы.** Эффективность работы струйной измельчительной установки зависит от степени загрузки измельчительной камеры и циркуляционной системы в целом. Однако немаловажную роль играют параметры энергоносителя и характеристики классификатора. Таким образом, выбраны основные факторы влияния на производительность измельчительной установки  $Q$  по готовому классу: степень загрузки  $Z$  мельницы (включая циркуляционную систему), давление  $P$  энергоносителя, число оборотов  $n$  ротора классификатора. Таким образом, функцией отклика от каждого фактора или от комплекса факторов влияния является производительность мельницы при измельчении выбранного материала.

Исследования проводились на лабораторной измельчительной струйной установке «УСИ-20» (ИТМ НАНУ и ГКАУ) производительностью 20 кг/ч, описанной в [2]. При этом давление энергоносителя (воздуха) при постоянной температуре изменялось в пределах 0,25 – 0,45 МПа. Эксперименты заключались в струйном измельчении шамота исходной крупностью менее 2,5мм при изменении давления энергоносителя и режимов классификации от 400 до 600 оборотов ротора классификатора.

**Методика.** При проведении экспериментальных исследований варьировался один из параметров при фиксированных значениях других, а затем эксперименты повторялись при других значениях фиксированных переменных. Такой подход позволил провести как парный регрессионный анализ для установления вида зависимости параметров от конкретного параметра, так и множественный, в котором учтено взаимное влияние рассматриваемых факторов. Перед проведением регрессионного анализа необходимо провести кодирование факторов. Кодирование факторов позволяет перевести натуральные значения факторов в безразмерные величины, что обеспечивает возможность сравнительной оценки влияния на процесс различных параметров независимо от их размерности, а также позволяет построить стандартную ортогональную план-матрицу эксперимента.

Связь между кодированным и натуральным выражением фактора задается формулой:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (1)$$

где  $x_i$  – кодированное выражение  $i$ -го фактора;  $X_i$  – натуральное значение фактора;  $X_{i0}$  – значение  $i$ -го фактора на нулевом уровне;  $\Delta X_i$  – интервал варьирования  $i$ -го фактора.

Обобщенные регрессионные зависимости изменения производительности мельницы от четырех варьируемых факторов для расчета задавались в виде полинома второй степени с учетом взаимного влияния переменных:

$$Y = a_0 + \sum_i^m a_i \cdot x_i + \sum_i^m a_i \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^m a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (2)$$

где  $Y$  – функция отклика ( $Q$ );  $a_0$  – свободный член уравнения;  $Y = a_i \cdot x_i$ ,  $a_{ii} \cdot x_i^2$  – линейные и квадратичные слагаемые;  $\pm a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$  – слагаемые парных произведений факторов;  $m = 3$  – число переменных факторов.

**Определение коэффициентов зависимости.** Коэффициенты заданной зависимости определялись методом наименьших квадратов средствами прикладного пакета обработки статистических данных Statgraphics Plus. После каждого цикла оценивается адекватность  $F$  (статистика Фишера) полученной модели экспериментальным данным. Вычисляется коэффициент детерминации  $R$ , который показывает, на сколько процентов изменчивость функции объясняется влиянием учтенных в модели факторов. По знаку коэффициента регрессии  $a_i$  можно определить влияние соответствующего фактора  $x_i$  на функцию: положительный знак свидетельствует о возрастании функции при увеличении фактора, отрицательный – о снижении. Абсолютное значение коэффициента  $a_i$  показывает, на сколько изменится результативный признак при изменении соответствующего фактора на единицу. Коэффициенты взаимодействий ( $\pm a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ ) оценивают влияние одного фактора в зависимости от уровня, на котором находится другой фактор. Знак плюс коэффициента  $\pm a_{ij}$  указывает на то, что одновременное увеличение или уменьшение факторов  $x_i$  и  $x_j$  приводит к росту отклика. Если коэффициент взаимодействия имеет знак минус, то рост величины отклика (исследуемой функции) обеспечивается в том случае, если один из факторов будет уменьшаться, а другой увеличиваться.

Таким образом, в результате расчета была установлена обобщенная регрессионная зависимости изменения производительности мельницы при варьировании трех параметров.

Данная регрессионная зависимость в пределах исследуемых параметров имеет коэффициент детерминации  $R=0,92$ , который показывает, что изменчивость функции  $Q$  на 92 % объясняется влиянием учтенных в модели факторов.

**Парные регрессионные зависимости.** При расчете парных регрессионных зависимостей варьировался каждый из трех параметров при фиксированных значе-

ниях других переменных, которые принимались равными их средним значениям, т. е. уровни соответствующих факторов принимались равными 0. На рис. 1 - 3 представлены трехмерные графики зависимостей  $Q$  от рассматриваемых факторов.

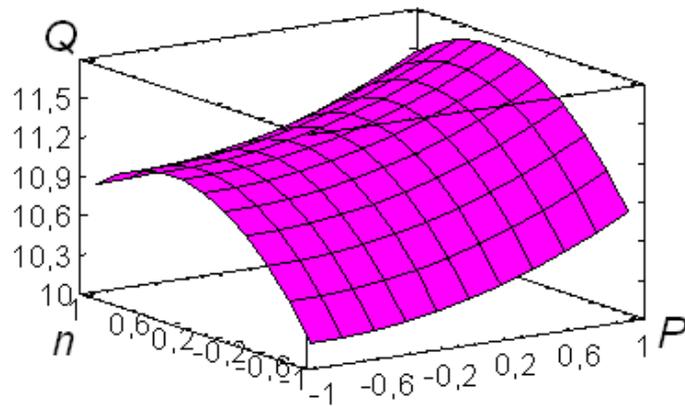


Рис.1. Зависимость производительности мельницы от давления энергоносителя и режима классификации

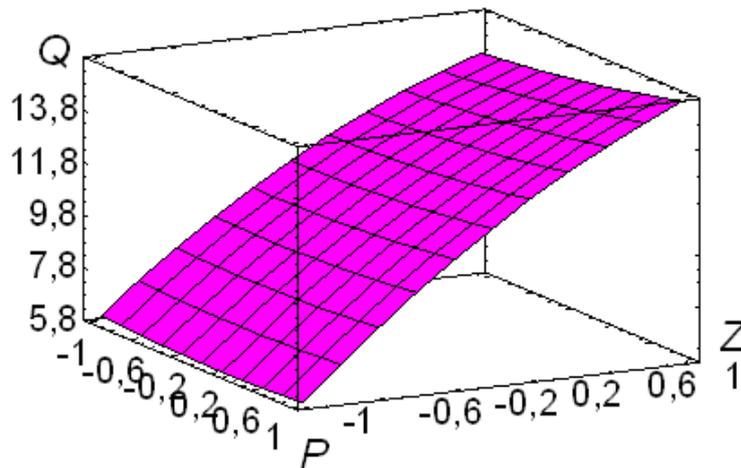


Рис.2. Зависимость производительности мельницы от загрузки мельницы материалом и давления энергоносителя

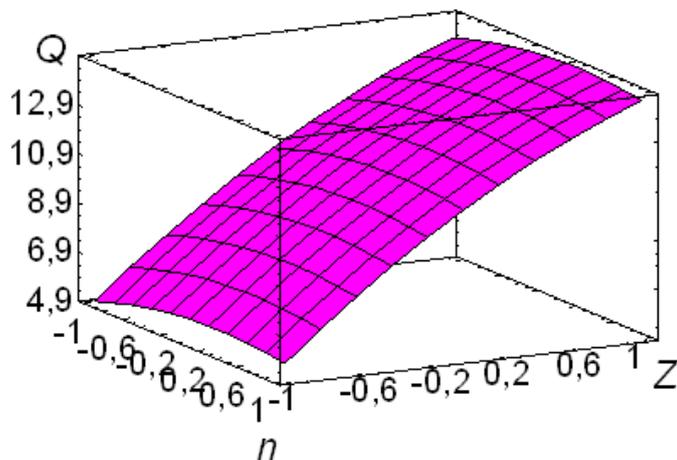


Рис. 3. Зависимость производительности мельницы от загрузки мельницы материалом и режима классификации

На графіку 4 показано вплив кожного фактора і групи факторів на функцію отклику  $Q$  (в процентах).

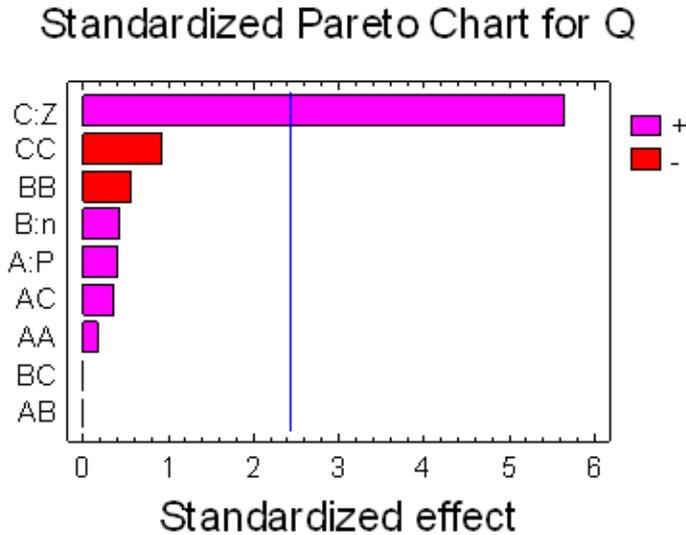


Рис.4. Влияние всех факторов и их групп на производительность мельницы

**Анализ результатов.** Из графика видно, что наибольшее влияние на величину  $Q$  оказывает фактор  $C$ , т. е. степень загрузки мельницы, а так же в меньшей мере фактор  $B$ , соответственно  $n$  (число оборотов ротора классификатора). Так, изменение степени загрузки мельницы на порядок существенно влияет на величину производительности мельницы, чем изменение числа оборотов классификатора (56 % и 0,4 % соответственно), причем рост степени загрузки вызывает рост производительности, тогда как увеличение удвоенного числа оборотов классификатора ( $n n$ ) ведет к уменьшению величины производительности. Однако увеличение загрузки мельницы имеет определенный предел по своему положительному влиянию на производительность: удвоенное увеличение загрузки ( $ZZ$ ) ведет к снижению производительности. В реальных условиях это ведет к перегрузке мельницы, так называемому «завалу» и нарушению режима измельчения. Влияние параметра  $A$  (давление энергоносителя) не является преобладающим и составляет всего 4 %, т.е. влияние на производительность мельницы изменения давления энергоносителя соизмеримо с изменением режима классификации (оборотов ротора классификатора).

Таким образом, была установлена обобщенная регрессионная зависимость производительности струйной мельницы от трех варьируемых параметров. В частности, для процесса измельчения шамота регрессионная зависимость (1) имеет вид:

$$Q = 11,21 + 0,32P + 0,34n + 4,5Z + 0,16P^2 + 0,38PZ - 0,54n^2 - 0,9Z^2 \quad (2)$$

**Зависимость амплитуды сигналов от выбранных факторов.** Проведены аналогичные исследования зависимости амплитуды акустических сигналов зоны измельчения от выбранных факторов. На рис. 5 показано влияние всех факторов и их групп на амплитуду акустических сигналов.

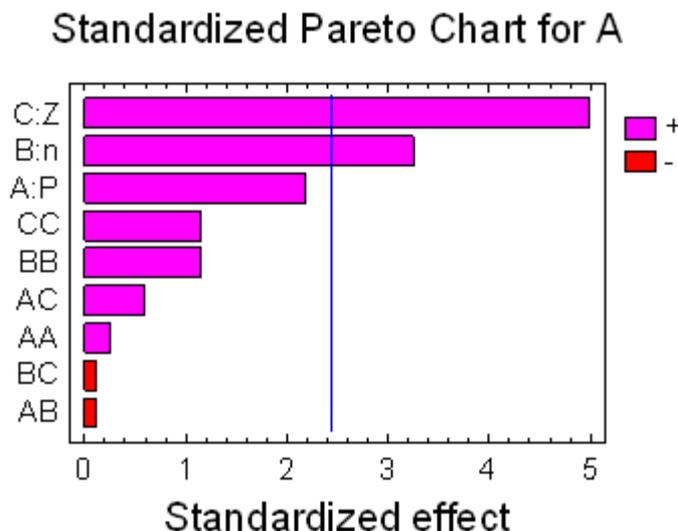


Рис.5. Влияние всех факторов и их групп на амплитуду акустических сигналов зоны измельчения

Установлено, что преобладающее влияние на амплитуду акустических сигналов мониторинга зоны измельчения оказывает степень загрузки мельницы материалом (50%). Чуть меньше влияние режима классификации (32%) и еще меньше (22%) – давления энергоносителя. Этот вывод совпадает с ранее проведенными исследованиями связи характеристик акустических сигналов с технологическими параметрами процесса измельчения [1]. Удвоенное влияние загрузки, как и удвоенное влияние режима классификации, не имеет решающего значения при измельчении (12%). Следует отметить, что влияние факторов (технологических параметров процесса) на амплитуду акустических сигналов носит одинаковый характер: с увеличением факторов увеличивается амплитуда. И только при одновременном увеличении загрузки и оборотов классификатора (т.е. при уменьшении крупности продукта) характер влияния этих факторов на амплитуду меняется, т.е. амплитуда уменьшается, хотя величина этого влияния незначительная (1 %).

На рис. 6 показана 3-х мерная зависимость амплитуды сигналов акустического мониторинга струйного измельчения шамота от степени загрузки и режима классификации. Зависимости амплитуды сигналов от других выбранных факторов носят аналогичный характер.

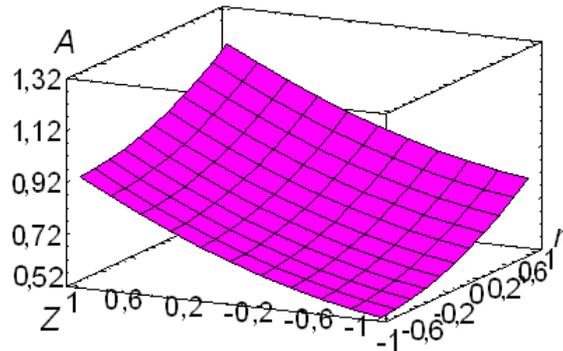


Рис. 6. Зависимость амплитуды акустических сигналов зоны измельчения от загрузки мельницы материалом и режима классификации

**Выводы.** Построенная регрессионная модель процесса струйного измельчения показала преобладающее влияние степени загрузки помольной камеры на производительность мельницы в целом. Полученные регрессионные зависимости влияния каждого принятого фактора на производительность струйной мельницы адекватно описывают процесс измельчения и могут быть использованы для повышения эффективности струйного измельчения.

Показанные зависимости амплитуды сигналов акустического мониторинга процесса измельчения от режимных технологических параметров подтверждают установленные ранее связи характеристик акустических сигналов рабочих зон мельницы с технологическими параметрами измельчения. Этот факт может служить основой применения результатов акустического мониторинга при разработке автоматической системы управления процессом. Необходимо продолжить исследования возможность разработки системы контроля качества продуктов измельчения на основе анализа характеристик записанных сигналов акустического мониторинга процесса

#### Перечень ссылок

1. Пилов, П. И., Горобец, Л.Ж. & Бовенко, В.Н. (2008). Акустическое исследование измельчаемости гетерогенных материалов струйным способом. *Збагачення корисних копалин*, (34), 67 – 74.
2. Прядко, Н.С. (2012). Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, (6), 46 – 52.
3. Горобец, В.И. (1972). *Оптимизация параметров и разработка способа автоматического регулирования газоструйной мельницы*. автореферат дисс. канд-та техн. наук: 05.13.07, Днепропетровск: Національний гірничий університет.
4. Прядко, Н. С. (2015). *Развитие теории тонкого измельчения полезных ископаемых*: автореферат дисс. д-ра техн. наук: 05.15.08. Днепропетровск: Національний гірничий університет.
5. Пилов, П. И., Горобец, Л.Ж., Прядко, Н.С. & Стрельников, Г.А. (2008). Исследование технологических и акустических характеристик струйного измельчения шамота. *Научные труды Дон НТУ*, (15), 158 – 164.
6. Терновая, Е. В. (2016). Анализ частот сигналов при транспортировании и измельчении сыпучих материалов в потоке. *Збагачення корисних копалин*, (63), 59 – 65.

## АНОТАЦІЯ

**Мета** – побудова на основі експериментальних даних регресійної моделі струминного подрібнення матеріалу та виявлення впливу основних параметрів процесу на ефективність подрібнення..

**Методика.** На підставі отриманих експериментальних результатів подрібнення шамоту лабораторною газоструминною подрібнювальною установкою з акустичним моніторингом процесу побудована регресійна модель струминного подрібнення з використанням прикладного пакету обробки статистичних даних Statgraphics Plus. Проведено кодування факторів й побудована план-матриця експериментів. Побудовані тривимірні графіки залежності продуктивності від факторів і Парето-графік для функції-відгуку, що показує взаємний вплив факторів.

**Результати.** Досліджені основні фактори, що впливають на ефективність струминного подрібнення матеріалів. Встановлено переважний вплив ступеня завантаження помольної камери на її продуктивність. Використано новий підхід до контролю продуктивності подрібнення. На базі застосування результатів акустичного моніторингу для аналізу режимів і дисперсності продуктів подрібнення показана залежність амплітуди акустичних сигналів зони подрібнення від технологічних параметрів процесу, що підтверджує встановлені раніше зв'язки характеристик акустичних сигналів робочих зон млина з технологічними параметрами подрібнення. Необхідно уточнити можливість розробки системи контролю якості продуктів подрібнення на основі аналізу характеристик записаних сигналів акустичного моніторингу процесу.

**Наукова новизна.** Отримані регресійні залежності впливу кожного прийнятого фактора на продуктивність струминного млина та на характеристики сигналів акустичного моніторингу адекватно описують процес струминного подрібнення і можуть бути використані для підвищення його ефективності.

**Практична цінність.** Результати дослідження є базою для розробки автоматичної системи управління роботою струминної подрібнювальної установки.

**Ключові слова:** струминне подрібнення, продуктивність, фактор, акустичний сигнал, амплітуда, регресійний аналіз, вплив

## ABSTRACT

**The study purpose** is to construct regression model of jet grinding based on the obtained experimental results and to reveal the influence of the main process parameters on the efficiency of grinding.

**Methodology.** A regression jet grinding model based on the obtained experimental results of grinding chamotte at the laboratory gas-jet grinding plant with acoustic monitoring of process was constructed with the use of the statistical data processing application package Statgraphics Plus. The coding of the factors was carried out and the experiment plan-matrix was constructed. Three-dimensional graphs of the productivity dependence on factors and a Pareto graph for the response function, showing the mutual factor influence, are constructed.

**Results.** The main factors which influence on the jet mill efficiency are investigated. The prevailing influence of loading degree of the grinding chamber on its productivity is established. A new approach has been used for grinding productivity control. Based on the application of the acoustic monitoring results for the analysis of the mill modes and grinding product dispersion, the depend-

ence of the acoustic signal amplitude of the grinding zone on technological parameters of the process is shown. It confirms the previously established relationships between the acoustic signal characteristics of mill working areas and the technological grinding parameters. It is necessary to clarify the possibility of a quality control system developing for grinding products based on a characteristic analysis of the recorded process acoustic monitoring signals.

**Scientific novelty.** The regression dependences of each accepted factor influence on the jet mill productivity and on the signal characteristics of the acoustic monitoring adequately describe the grinding process and can be used for increasing its efficiency.

**Practical significance.** The research results are the basis for the automatic control system development of a jet grinding plant operation.

**Key words:** *jet grinding, productivity, factor, acoustic signal, amplitude, regression analysis, influence*

УДК 621.787: 621.7.044.2: 669.018.25

© Ю.В. Савченко

## ПРОГРЕСИВНИЙ БУРОВИЙ ІНСТРУМЕНТ З ВИСОКИМ РЕСУРСОМ ТА ВЛАСТИВОСТЯМИ

© Iu. Savchenko

## PROGRESSIVE A DRILLING TOOL WITH HIGH OF RESOURCES AND PROPERTIES

**Мета.** Розробити промислову високоефективну технологію виробництва ріжучого, руйнуючого і формоутворювального інструменту використовуючи аналіз технологій регенерації металокерамічних сплавів і вибрати найбільш “екологічно чисту” і рентабельну технологію переробки відходів твердих сплавів.

**Методика.** В якості методики дослідження для представленої роботи були розглянуто аналіз існуючих кілька методів регенерації відходів вольфрамом кобальтових твердих сплавів: піро– та гідрометалургійний, хімічний (хлорний, цинковий), термохімічний і з застосуванням енергії вибуху бризантних вибухових речовин.

**Результати.** Виготовлені та випробуванні різці ЗР4-80 виконавських шнекових органів вугільного комбайна типу 1К101У та різці РКС-1С які були встановлені для випробувань на шахті "Павлоградська" на комбайн ГПКС-1.

**Наукова новизна.** Показана принципова можливість використання ударно–хвильової обробки, як фактор, що стимулює процеси руйнування порошкових виробів будь–якої конфігурації, з метою отримання високоякісного порошку для подальшої формування, спікання і виробництва інструменту різного призначення, запропоновано екологічно чиста технологія переробки надтвердих матеріалів, металокерамічних складових застарілої військової техніки і різних видів боєприпасів.