УДК 622.73 https://doi.org/10.15407/itm2024.01.083

К. В.ТЕРНОВА, О. В. ПРЯДКО, Л. В. МУЗИКА

ВИЗНАЧЕННЯ КРУПНОСТІ ПРОДУКТІВ ПОДРІБНЕННЯ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Ляшко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: alexander.pr@gmail.com

Розглянуто математичні підходи до визначення величини крупності частинок при замкнутих циклах подрібнення корисних копалин. Показано особливості обчислення середніх розмірів частинок різних класів крупності з урахуванням кінетики подрібнення. Запропоновано алгоритми обчислення крупності частинок одержаних продуктів у всьому діапазоні класів крупності матеріалу. Особливу увагу приділено визначенню виходу класів скільки завгодно малих частинок. Показано спосіб визначення крупності частинок на основі використання функції розподілу, що виражена за допомогою логнормального закону. Вибір математичного підходу здійснюється з урахуванням технологічних вимог виробництва.

Основою безконтактного контролю дисперсності матеріалу в потоці є акустичний моніторинг процесу та встановлені зв'язки розміру частинок з акустичними характеристиками. Встановлено залежності амплітуди сигналів від технологічних режимів подрібнення та розмірів частинок при транспортуванні матеріалу в потоці енергоносія та струминному подрібненні. В роботі для визначення фракційного складу суміші розглянуто частотні характеристики акустичних сигналів та їх зміни при транспортуванні вузьких фракцій і сумішей матеріалів. Аналіз амплітудно-частотних характеристик сигналів акустичного моніторингу процесу пневмотранспортування вузьких фракцій матеріалів у потоці стисненого повітря в каналах струминного млина підтвердив наявність сигналів із частотами, характерними для кожної фракції. Експериментально встановлена залежність дисперсії цих частот від крупності частинок та розміру фракції у суміші. Ці дослідження створюють основу безконтактного методу визначення гранулометричного складу матеріалу у потоці повітря, зокрема, при струминному подрібненні. Результати можуть бути використані для інженерних та технологічних розрахунків при підготовчих процесах збагачення корисних копалин, розробці технологічного обладнання хімічної, будівельної, гірничо-металургійної промисловості.

Ключові слова*: закон розподілу, клас подрібнення, акустичний сигнал, частота, дисперсія*.

Mathematical approaches to particle size determination in closed grinding cycles are considered. The features of average particle size calculation for different fractions with account for the grinding kinetics are shown. Particle size calculation algorithms for the entire fraction range are proposed. Particular attention is paid to output determination for fractions of arbitrarily small particles. A particle size determination method based on a lognormal distribution function is shown. In choosing the mathematical approach, the process requirements are taken into account.

The basis of in-flow noncontact particle size control is the acoustic monitoring of the process and the established relationships between the particle size and the acoustic characteristics. The signal amplitude during material transportation in the energy carrier flow and jet grinding was found as a function of the particle size and grinding conditions. In order to determine the fractional composition of a mixture, the frequency characteristics of acoustic signals and their variation during the transportation of narrow fractions and mixtures were considered. The analysis of the amplitude-frequency characteristics of acoustic signals during the compressed-air transportation of narrow fractions in the jet mill channels confirmed the presence of signals with frequencies characteristic for each fraction. These frequencies were experimentally related to the particle size of a fraction in a mixture. These studies form a basis for a noncontact method of determining the particle size distribution of a material in an air flow, in particular in jet grinding. The results may be used for engineering and technological calculations in mineral dressing and the development of process equipment for the chemical industry, construction, mining, and metallurgy.

Keywords*: distribution law, size grade, acoustic signal, frequency, dispersion.*

Вступ. Процеси подрібнення широко використовуються для попереднього збагачення корисних копалин та підготовки мінеральної сировини у багатьох галузях промисловості. На збагачувальних фабриках процеси подрібнення призначені для розкриття (роз'єднання) зерен, що зрослися між собою, різних мінералів корисної копалини. Чим повніше відбувається розкриття зерен корисних копалин в результаті подрібнення, тим ефективніше відбувається його подальше збагачення. Різні види млинів застосовуються у гірській, хімічній, будівельній промисловості, у виробництві скла, пластмас, порошкової металургії, кераміки, вибухових речовин, твердих палив, лікарської продукції та інших видів тонкодисперсних матеріалів. Однак, процеси подрібнення дуже енергоємні, тому важливою та актуальною проблемою є вибір оптимального режиму подрібнення за продуктивністю, енергоспоживанням та отримання продукту необхідної крупності. Контролювати крупність, а, значить, якість продукту подрібнення необхідно постійно і без зупинки технологічного процесу. Визначити крупність можна теоретично з промисловою верифікацією, або необхідно розвивати безконтактні методи.

Важливим напрямом удосконалення технології струминного подрібнення є розвиток методів своєчасного визначення середньої крупності готового продукту та контролю наявності частинок класу, який більший за контрольний, при цьому висувається вимога – визначення крупності без зупинки процесу подрібнення. Тому актуальним завданням є дослідження зв'язків крупності частинок в потоці матеріалу з амплітудно-частотними характеристиками сигналів при акустичному моніторингу процесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо досить багато експериментальних та теоретичних робіт, присвячених дослідженню процесів подрібнення у технологічних апаратах [1]. Однак, незважаючи на те, що основні положення фізики подрібнення, механіки руйнування за останні десятиліття не змінилися, сам технологічний процес подрібнення недостатньо вивчений. Це зумовлено складними технологічними процесами, які мають випадковий характер. Тому основне завдання процесу подрібнення, що полягає у встановленні зв'язку між витраченою енергією і досягнутою дисперсністю матеріалу, вирішувалося різними шляхами. Для теоретичного аналізу закономірностей процесів руйнування та формування функції розподілу частинок за розмірами раніше використовували середньоарифметичну величину класу крупності частинок. Використання методів статистичного моделювання механічних сумішей дозволяє описувати сукупні характеристики ансамблю частинок та встановлювати зв'язки цих характеристик із законами розподілу індивідуальних властивостей частинок [2, 3].

Для технологічних процесів подрібнення часом достатньо знати середню величину класів крупності частинок, розміром менше заданої технологічної величини, або відсоток частинок з крупністю, що більше тієї ж величини. Це визначається практично методами гранулометричного аналізу. Наявність дрібних частинок, розміром близьких до нуля, істотно впливає на процеси збагачення. Інформацію про відносний вихід цих класів можна отримати в результаті седиментаційного аналізу. Однак, такий аналіз є надзвичайно трудомісткою операцією що, як правило, відсутня. Тому важливо визначити правило обчислення розподілу частинок за розмірами або крупністю, що частіше зустрічається в попередніх процесах збагачення корисних копалин.

Останнім часом акустичний аналіз широко використовується для вивчення стану поверхонь (при руйнуванні) [4], стану суспензій і двофазних потоків [5 – 7] і тощо. Для аналізу крупності можливо використовувати активні та пасивні методи, що включають: методи проходження, відображення, комбіновані (які використовують як проходження, так і відображення), імпедансні та методи власних частот.

В Інституті технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України розробили акустичний метод визначення крупності частинок в потоці при струминному подрібненні [8]. Це дозволяє контролювати якість продукту без зупинки технологічного процесу.

Мета дослідження. Розробка алгоритмів визначення крупності частинок у всьому діапазоні їх розподілу при замкнутих циклах тонкого подрібнення без зупинення процесу.

Результати дослідження. Технологія скорочення крупності сировини стикається з кількома труднощами. З одного боку, необхідно отримати частинки заданої крупності, що визначається гранулометричним складом або питомою поверхнею продукту. З іншого боку, необхідно запобігти переподрібненню матеріалу у зв'язку з тим, що ефективність збагачення може значно змінюватись в залежності від крупності частинок, а видалення з циклу частинок максимально можливої крупності зменшує вартість подрібнення. Тому скорочення крупності матеріалу зазвичай виробляється кількома послідовними кроками технологічного ланцюжка, і процес подрібнення знаходиться у тісному зв'язку з класифікацією матеріалу, яка дозволяє виводити з технологічного процесу цільові фракції матеріалу, не допускаючи його переподрібнення і зайвої витрати енергії, що підводиться.

Опис зміни крупності матеріалу у замкнутому циклі подрібнення.

Після першого проходу матеріалу через млин та класифікатор кількість матеріалу на доподрібнення (повернення) становить:

$$q_1 = q_0(1-\gamma_1)\,, \tag{1}$$

де q_0 – кількість заданого класу крупності на вході процесу подрібнення; γ – вихід продукту після класифікатора.

Другий прохід матеріалу включає повернення матеріалу після класифікатора та нову порцію вихідного матеріалу, тобто

$$q_2 = q_0(1-\gamma_1) + q_1(1-\gamma_2) = q_0(1-\gamma) + q_0(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)\,.$$

Аналогічно після N проходів до млина надходить кількість матеріалу

$$q_N = q_0 \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{i} (1-¥_j)_i\ . \tag{2}$$

Розглянемо вихід продукту після класифікатора. Нехай відома сепараційна характеристика класифікатора та функція розподілу частинок продукту подрібнення, тобто крива гранулометричного складу. Тоді вихід продукту можна визначити за співвідношенням:

$$\gamma = \int_0^{d\max} P(d) f(d) dx\ . \tag{3}$$

Дослідження показали, що при подрібненні в замкнутому циклі вихід на перехідному періоді не істотно змінюється, тому можна припустити, що $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \ldots = \gamma_n = \gamma$. Тоді послідовність многочленів у (2) є геометрична прогресія зі знаменником $(1-¥)$, сума якої дорівнює $S = \frac{1-(-¥)^N}{¥}$, а її межа при $N \to \infty$ дорівнює $S = \lim S = \lim \frac{1-(-¥)^N}{¥} = 1/¥$. Отже, при встановленому робочому режимі кількість матеріалу, що надходить на подрібнення, становитиме:

$$q_N = q_0/\gamma\,. \tag{4}$$

Дослідження крупності продукту подрібнення

Розглянемо якісний склад подрібненого продукту [9].

Спочатку розглянемо випадок, коли необхідно знати середньо-інтегральні величини, зокрема, середню крупність подрібненого продукту d. З рівняння кінетики подрібнення отримуємо:

$$d = d_0 \exp(-kt)\,, \tag{5}$$

де k – константа подрібнення; t – час подрібнення; d_0 – вихідна крупність матеріалу.

Нехай розглядається стабільна робота млина з відомим часом подрібнення $t = t'$. Тоді після першого кола подрібнення середня крупність стане $d_1 = d_0 \exp(-kt') = d_0 A$, де $A = e^{-kt'}$ – відома величина. Після другого кроку маємо $d_2 = d_1 A = d_0 A^2$. Аналогічно після n-кроку середня крупність буде $d_2 = d_n A^n$.

Кількість виходу продукту визначається виходом γ, тоді вихід всього потоку матеріалу з млина можна визначити виходом циркулюючого навантаження $(1-\gamma)$. Якщо використовувати середньозважену формулу, то вихідна крупність млина визначається на другому проході як $d_2 = \dfrac{d_0 A + d_0 A^2 (1-¥)}{1+(1-¥)}$. Аналогічно знаходимо крупність матеріалу на наступних проходах, тоді на n - кроці крупність визначається

$$d_n = d_0 \frac{A + A^2(1-\gamma) + \ldots + A^n (1-\gamma)^{n-1}}{1 + (1-\gamma) + \ldots + (1-\gamma)^{n-1}}\,. \tag{6}$$

Вираз (6) можна представити як відношення двох геометричних прогресій, межі сум яких відповідно рівні:

$$\lim S_1 = \lim \frac{A(A^n (1-\gamma)^n - 1)}{A(1-\gamma) - 1} = \frac{A}{1 - A(1-\gamma)},$$

$$\lim S_2 = \lim \frac{(1-\gamma)^n - 1}{(1-\gamma) - 1} = 1/\gamma.$$

Отже, крупність частинок продукту подрібнення млином, що працює в замкнутому циклі з класифікатором, буде

$$d = d_0 \frac{A\gamma}{1 - A(1-\gamma)}\,. \tag{7}$$

Наведені вище міркування справедливі для обліку середніх значень величин. Однак, якщо цікавить вихід продукту певного дрібного класу крупності, то треба йти іншим шляхом.

Визначення виходу дрібного класу крупності продукту

Як відомо [9], граничним законом розподілу крупності при подрібненні незалежно від його способу є логарифмічно-нормальний розподіл. Справжній закон розподілу асимптотично наближається до граничного. У роботі вивчено поведінку функцій, що описують розподіл часток по крупності у різних областях її зміни. Встановлено, що ці функції підпорядковуються модифікованому нормальному логарифмічному розподілу Колмогорова і узагальненому закону розподілу Вейбулла. Визначено точку з'єднання кривих розподілу та встановлено зв'язок параметрів, що регулюють характер поведінки кривої розподілу до і після цієї точки.

В [9] описаний метод обчислення середнього розміру частинок у суміші при розподілі їх по крупності, який дозволяє вирішувати завдання визначення якості продуктів подрібнення та збагачення з необхідною точністю. Отримання формул для еквівалентних діаметрів частинок класу під час моделювання процесів дозволяє одночасно визначити закон розподілу у цьому класі. Однак у цьому випадку не враховано особливості розподілу частинок малих розмірів. Далі нас цікавитимуть частки, крупність яких як завгодно близька до нуля.

Знайдемо явні вирази для функцій розподілу частинок $F(x)$ й $f(x)=F'(x)$ у діапазоні крупності 0 - ε, якщо відомо, що $\Phi(x)$ – справжня функція розподілу виражається за допомогою логнормального закону.

Позначимо щільність нормального закону з параметрами $(0;1)$ через $\phi_H(Z)$, де $\phi_H(Z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-z^2/2}$ і функцію розподілу через $\Phi_H(Z)$, де

$$\Phi_H(Z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{Z}e^{-t^2/2}dt\,. \qquad (8)$$

Тоді при $x\to 0$ асимптотично буде виконуватись рівняння

$$\phi(x)=\frac{1}{\sigma}\phi_H\left(\frac{1}{\sigma}\ln\frac{x}{\varepsilon}\right),\quad \Phi(x)=\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma}\ln\frac{x}{\varepsilon}\right). \qquad (9)$$

Позначимо вираз у дужках, як $t=\frac{1}{\sigma}\ln\frac{x}{\varepsilon}$.

Оскільки $f(x)\sim x\cdot\varphi(x)$, то $f(x)=C\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-t^2/2}$.

Для подальших обчислень необхідно ввести допоміжну функцію інтервалу $(a,b)\subset(0,\varepsilon)$, яку позначимо у вигляді $J_k(a,b)=\int_a^b x^{-k}f(x)dx$.

З урахуванням збереження виходу класу $0-\varepsilon$ $\left(F(\varepsilon)=J_0(0,\varepsilon)\right)$ знайдемо

$$J_k(a,b)=F(\varepsilon)\frac{\exp\left\{\frac{\sigma^2}{2}\left[(k-1)^2-1\right]\right\}}{\varepsilon^k\Phi_H(-\sigma)}\left[\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma}\ln\frac{b}{\varepsilon}+\sigma(k-1)\right)-\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma}\ln\frac{a}{\varepsilon}+\sigma(k-1)\right)\right]. \qquad (10)$$

Використовуючи цей вираз, можна отримати всі залежності, що нас цікавлять. Так $F(x)=J_0(0,x)$, тому для функції вагового розподілу справедлива формула

$$F(x)=\frac{F(\varepsilon)}{\Phi_H(-\sigma)}\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma}\ln\frac{x}{\varepsilon}-\sigma\right), \qquad (11)$$

а для щільності $f(x)$

$$f(x)=\frac{F(\varepsilon)e^{-\sigma^2/2}}{\varepsilon\cdot\sigma\cdot\Phi(-\sigma)\sqrt{2\pi}}e^{-t^2/2}\ . \tag{12}$$

Еквівалентний розмір класу (a,b) є $Z(a,b)=\dfrac{J_0(a,b)}{J_1(a,b)}$, тому

$$Z(a,b)=\varepsilon\cdot e^{\sigma^2/2}\frac{\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma}\ln\frac{b}{\varepsilon}-\sigma\right)-\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma}\ln\frac{a}{\varepsilon}-\sigma\right)}{\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma}\ln\frac{b}{\varepsilon}\right)-\Phi_H\left(\frac{1}{\sigma}\ln\frac{a}{\varepsilon}\right)}. \tag{13}$$

Аналогічно для класу $(0,x)$ одержимо

$$Z(0,x)=\varepsilon\cdot e^{\sigma^2/2}\frac{\Phi_H(t-\sigma)-\Phi_H(-\sigma)}{\Phi_H(t)-0.5}. \tag{14}$$

Для знаходження параметрів у рівнянні (9) зауважимо таке.

Якщо відомо значення виходу $F(\varepsilon)$ класу $0-\varepsilon$, необхідно знайти лише один параметр σ, оскільки мода розподілу £ відома під час аналізу скільки завгодно малих частинок подрібнення конкретних матеріалів. Зокрема, експериментально було визначено, що для розсіювання шламів £ = 0,041, для струминного подрібнення шамоту £ = 0,045.

Допустимо, нам відомий вихід класу (0 – 0,01) мм. Позначимо через p відношення $p=\dfrac{F(0{,}01)}{F(\varepsilon)}$, тоді $p=\dfrac{\Phi_H\left(-\frac{1}{\pm}\ln\frac{x}{2}-\pm\right)}{\Phi_H(-\pm)}$.

Ми отримали неявну функцію $\pm=\pm(p)$. Маючи таблицю цієї функції і знаючи величину p можна знайти значення $\pm$ [10]. Далі за викладеним алгоритмом можна знайти всі необхідні величини, що визначають розподіл часток крупністю як завгодно малою.

Безконтактний метод

Основою безконтактного контролю дисперсності матеріалу в потоці є акустичний моніторинг процесу та встановлені зв’язки розміру частинок з акустичними характеристиками [8, 11]. Розроблено метод оптимізації технології струминного подрібнення на основі використання явища акустичної емісії під час руйнування твердих тіл для моніторингу процесу подрібнення. Встановлено залежності амплітуди сигналів від технологічних режимів подрібнення та розмірів частинок при транспортуванні матеріалу в потоці енергоносія та струминному подрібненні [8]. Однак, для визначення фракційного складу суміші недостатньо аналізу лише амплітудних характеристик сигналів. Необхідно розглянути частотні характеристики акустичних сигналів та їх зміни під час транспортування вузьких фракцій та сумішей матеріалів.

Експериментальні дослідження

В ході експериментальних досліджень [11] було отримано спектри частот сигналів, записаних у ході моніторингу процесу транспортування різних фракцій сипучих матеріалів (кварц, шлак, шамот). На рис. 1 – 2 наведено деякі результати аналізу спектрів сигналів для матеріалів різної крупності та густи-

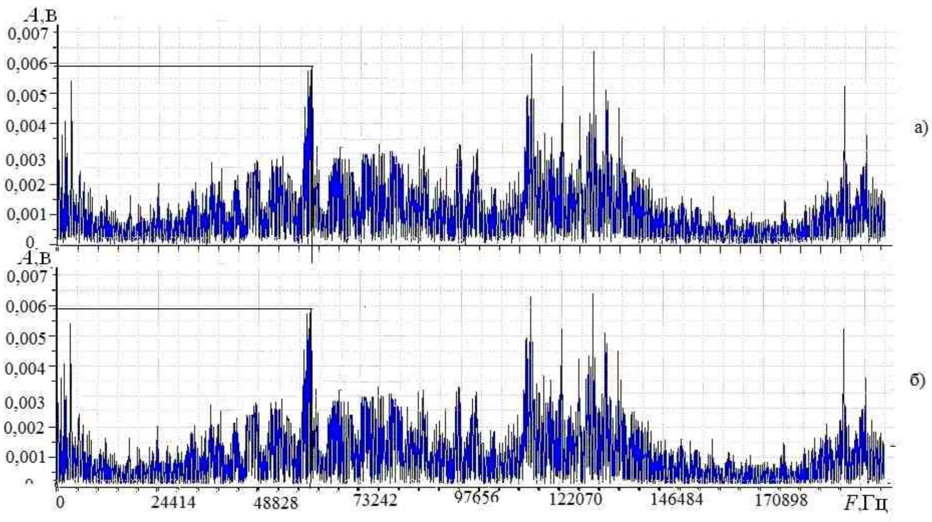


Рис. 1 – Амплітудно-частотний спектр акустичних сигналів при транспортуванні шлаку крупністю -0,63+0,4 мм (a) та -0,4+0,315 мм (b)

ни.

Весь діапазон частот акустичних сигналів, що записуються в ході моніторингу процесу транспортування сипких матеріалів, можна розділити на 4 ділянки (див. рис. 2).

Ділянка	1	2	3	4
Діапазон, kHz	0 – 48	48 – 90	90 – 160	> 160

Аналіз результатів моніторингу акустичних сигналів показав, що сигнали другого вузького діапазону частот (48 – 90) кГц мають амплітуди, які залежать від крупності матеріалу, причому ці амплітуди зменшуються зі змен-

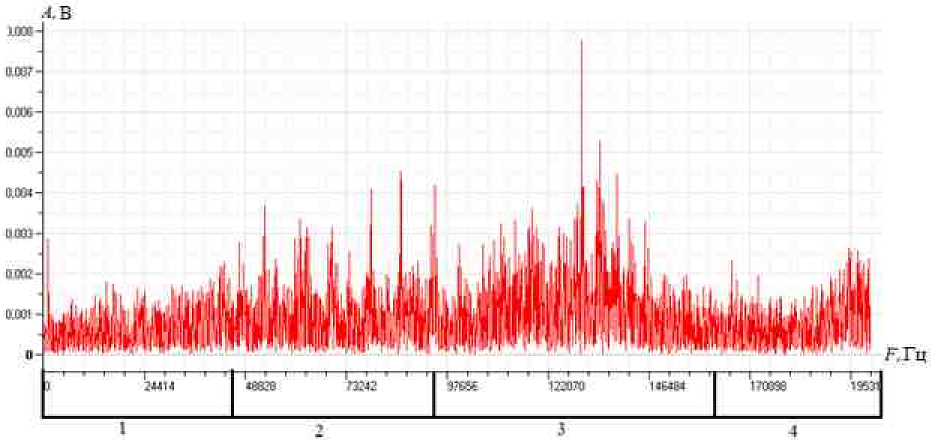


Рис. 2 – Амплітудно-частотний спектр акустичних сигналів під час транспортування суміші кварцового піску

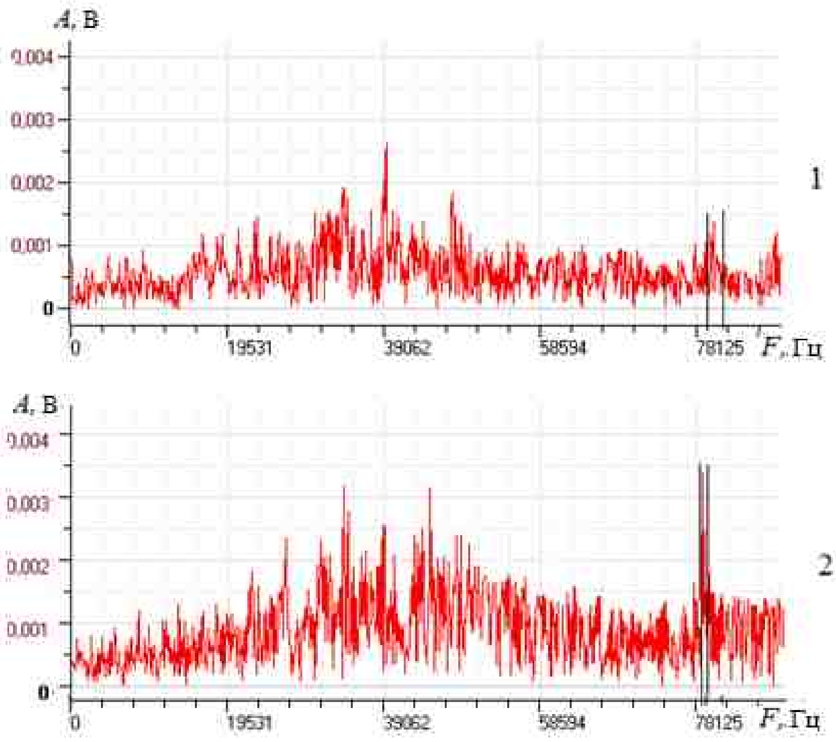
шенням густини матеріалу [8].

Пошук залежності між амплітудою частоти та крупністю частинок з 1, 3 та 4 діапазонів частот не дав позитивних результатів. Сигнали першого та третього діапазону частот завжди присутні у спектрі частот, навіть при русі потоку повітря без частинок. Це, швидше за все, перешкоди, які створюються спонтанним зменшенням густини дрібних мас повітря.

Проаналізувавши спектри частот різних матеріалів (кварц, шлак, шамот) різної крупності при транспортуванні в потоці повітря отримали характерні частоти для кожної з розглянутих фракцій. При цьому з розглянутого спектра частот сигналів були виключені частоти від 0 до 48 кГц і вище 90 кГц у зв'язку з тим, що дані частоти не несуть інформації про розмір часток, вони характерні для процесу в цілому. У ході досліджень зв'язків крупності матеріалу з акустичними параметрами сигналів отримані амплітуди сигналів з відповідними характерними частотами для певного розміру частинок [8].

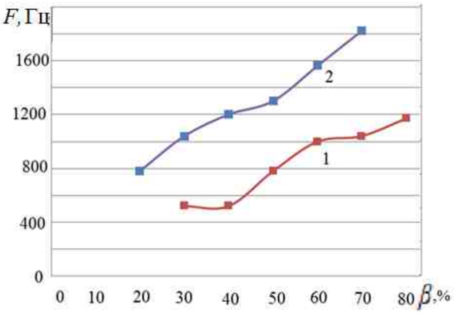
Вихідний матеріал для подрібнення є сумішшю тих чи інших фракцій. Для дослідження фракційного складу матеріалу використовувався аналіз дисперсії характерних частот сигналів при моніторингу транспортування суміші пари вузьких фракцій шамоту та кварцового піску Вільногірського родовища в різних пропорціях.

Вихід фракцій матеріалу вибирався від 80 г до 20 г за постійної суми – 100 г. На рис. 3 та рис. 4 показані амплітудно-частотні спектри акустичних сигналів, записаних при транспортуванні сумішей шамоту, що складаються з



1 – 70 грам фракції -0,63 + 0,4 мм, 30 грам фракції -1,0 + 0,63 мм;
2 – 30 грам фракції -0,63 + 0,4 мм, 70 г фракції -1 + 0,63 мм

Рис. 3 – Амплітудно-частотний спектр сигналів при транспортуванні суміші шамоту



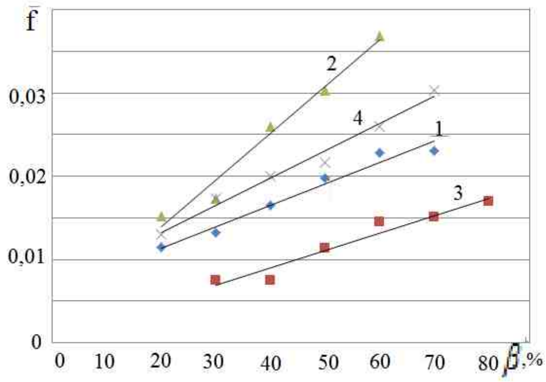
1 – фракція –0,315 +0,2;
2 – фракція –0,4+0,315.

Рис. 4 – Залежність дисперсії частоти акустичних сигналів від маси фракцій кварцу

2 фракцій різної крупності масою 70 г і 30 г відповідно

Як видно з рисунків, характерна частота сигналів акустичного моніторингу для фракції -0,63 мм + 0,4 мм (79 кГц) при зміні кількості фракції суміші має різну величину дисперсії (див. рис. 3).

Попередній аналіз результатів дозволив встановити існуючу залежність дисперсії характерної частоти акустичних сигналів від відповідної маси фракції суміші при транспортуванні матеріалу в потоці. У зв’язку з цим, для більш загального випадку величину дисперсії частоти акустичних сигналів нормалізували величиною характерної частоти. Інформація, що подана на рис. 5, дозволяє дійти до висновку, що характер залежності описується лінійної функцією виду $\bar{f} = a \quad + b$. Коефіцієнти *a*, *b* залежать від розміру частинок фракції та властивостей матеріалу, причому коефіцієнт *a* пря-



шамот: 1 – фракція –0,63+0,4;
2 – фракція –0,4+0,315; кварц:
3 – фракція –0,315+0,2;
4 – фракція –0,4+0,315

Рис. 5 – Залежність нормованої дисперсії частоти акустичних сигналів від маси

мо пропорційно залежить від величини частинок фракції.

Слід зазначити, що коефіцієнт *a* – має те саме значення для фракцій однакової крупності різних матеріалів, тобто є ознакою крупності частинок фракції. З іншого боку, $a = \ \bar{f}' = \frac{df}{d}$. Таким чином, встановлені залежності нормованої дисперсії характерної частоти та її похідної від виходу (маси) та крупності фракції, відповідно, $\bar{f} = a \quad + b$ і $\bar{f}' = \frac{df}{d} = k = cd - p$. Ці результати дозволяють за отриманою в ході акустичного моніторингу дисперсією нормованої частоти визначити крупність та величину (масу) фракції.

Висновки. Запропоновані алгоритми обчислення крупності частинок при замкнутих циклах подрібнення дозволяють визначати розподіл крупності одержуваних продуктів у всьому діапазоні. Вибирати математичний підхід можна з урахуванням технологічних вимог виробництва.

Аналіз амплітудно-частотних характеристик сигналів акустичного моніторингу процесу пневмотранспортування вузьких фракцій матеріалів у потоці стисненого повітря в каналах струминного млина підтвердив наявність сигналів із частотами, характерними для кожної фракції. Експериментально встановлена залежність дисперсії цих частот від крупності частинок та розміру фракції у суміші. Ці дослідження створюють основу безконтактного методу визначення гранулометричного складу матеріалу в потоці повітря.

1. *Купін А. І.* Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології. Кривий Ріг: Видавництво КТУ, 2008. 204 с.
2. *Maruf Hasan, Sam Palaniandy, Marko Hilden, Malcolm Powell* Simulating product size distribution of an industrial scale VertiMill using a time-based population balance model Minerals Engineering. 2018. Vol. 127, October. P. 312─ 317 https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.11.007
3. Danielle Campos RochaPredicting the product particle size distribution from a laboratory vertical stirred mill// Minerals Engineering. 2018. Vol. 129, December. P. 85–92. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.09.016
4. *Dotto F. R. L., Aguiar P. R., Alexandre F. A. et al.* Acoustic image-based damage identification of oxide aluminum grinding wheel during the dressing operation. Procedia CIRP. 2019. V. 79. Pp. 298–302. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.070
5. *Thurley M. and Andersson T.* An industrial 3d vision system for size measurement of iron ore green pellets using morphological image segmentation. Minerals Engineering. 2007. 21(5). P. 405–415. http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2007.10.020
6. *Zhiyong Gao Fan Ruiying, Ralston John, Sun Wei, Hu Yuehua.* Surface broken bonds: An efficient way to assess the surface behaviour of fluorite. Minerals Engineering. 2019. V. 130. Pp. 15-23. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.09.024
7. *Campbell A., Thurley M.* Application of laser scanning to measure fragmentation in underground mines. Mining Technology. 2017. V. 126. No. 4. Pp. 240–247. https://doi.org/10.1080/14749009.2017.1296668
8. *Pryadko N. S., Ternova K. V.* Acoustic monitoring of jet grinding. Kyiv: Akadem periodyka, 2020. 192 pp. (in Ukrainian). https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.409.192
9. *Pryadko N. S.* Determination on the control characteristics of mineral processing technology indicators: an update. In: Advances and Challenges in Science and Technology. Vol. 6. 9 October 2023. Pp. 1–15. https://doi.org/10.9734/bpi/acst/v6/11147F
10. *Pryadko N., Mladetsky I., Dziuba S., Ternova K.V.* Investigation of the control characteristics of mineral processing technology indicators. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 970. No. 1. 012001. 9 pp. https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012001
11. *Терновая Е. В.* Анализ частот сигналов при транспортировании и измельчении сыпучих материалов в потоке. Збагачення корисних копалин. 2016. № 63 (104). С. 59–65.

Отримано 12.02.2024,
в остаточному варіанті 19.03.2024