

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ТЕРНОВА КАТЕРИНА ВІТАЛІЇВНА

УДК 622.7:622.73

**ОБҐРУНТУВАННЯ АКУСТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ДИСПЕРСНОСТІ
ПРОДУКТІВ ПОДРІБНЕННЯ**

05.15.08 – «Збагачення корисних копалин»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі термогазодинаміки енергетичних установок Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (м. Дніпро).

Науковий керівник доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Прядко Наталія Сергіївна

Офіційні опоненти:

– доктор технічних наук, професор
Младецький Ігор Костянтинович,
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»
Міністерства освіти і науки України
(м. Дніпро),
професор кафедри
збагачення корисних копалин

– кандидат технічних наук
Олійник Максим Олегович,
Державний вищий навчальний заклад
«Криворізький національний університет»,
старший викладач кафедри
збагачення корисних копалин

Захист відбудеться “07” червня 2018 р. о годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.02 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Яворницького, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Яворницького, 19.

Автореферат розісланий “ ” травня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.02,
к.т.н., доцент



О.О. Борисовська

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для механоактивації матеріалів і одержання продуктів з якісно новими властивостями в багатьох технологічних процесах застосовують їх тонке подрібнення. Продукти механічного подрібнення твердих матеріалів складаються з суміші частинок, розмір яких коливається, і для подальшого їх використання необхідно знати зерновий склад, дисперсність, гранулометричний склад, а іноді зміну характеристик в часі, тобто кінетику. Аналіз гранулометричного складу порошків і пов'язані з ним показники є поширеним методом досліджень властивостей речовин, матеріалів і виробів у багатьох технологічних процесах. Розробка та створення методів та засобів контролю є одним з основних напрямків науково-технічних розробок, які повинні забезпечуватися точністю вимірювань. У зв'язку з високим темпом науково-технічного прогресу спостерігається тенденція зростання вимог до точності та достовірності контролю з використанням обчислювальної техніки. Таким чином, розробка і обґрунтування акустичного контролю дисперсності продуктів подрібнення є **актуальною науковою задачею**, яка має важливе значення для безперервного та оперативного контролю якості продуктів подрібнення мінеральної сировини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Робота виконана у відділі термогазодинаміки енергетичних установок Інституту технічної механіки НАН України і ДКА України відповідно до держбюджетних тем:

– «Дослідження підвищення ефективності газоплазмодинамічних процесів в пристроях різного призначення» № ДР 0112U001322 (2012-2014 рр.);

– «Дослідження газоплазмодинамічних і тепломасообмінних процесів щодо удосконалення технічних пристроїв» № ДР 0115U001031 (2015-2017 рр.), за якими автор була виконавцем відповідних розділів.

Результати роботи використані при виконанні теми Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» № ГП–494 «Технологічні основи використання у будівництві механоактивованих та наноструктурованих супутніх корисних копалин і відходів гірничометалургійного виробництва» № ДР 0117U001132 (наказ МОН України №199 від 10.02.17 р.).

Мета роботи – обґрунтування акустичного контролю дисперсності продуктів подрібнення на основі зв'язку дисперсності матеріалів і акустичних параметрів процесу.

Для досягнення цієї мети вирішуються наступні задачі:

- 1) обґрунтувати використання акустичного моніторингу для визначення дисперсності матеріалу при транспортуванні в потоці газосуспензії;
- 2) на основі теоретичних і експериментальних досліджень виконати моделювання кінетики гранулометрії продуктів струминного подрібнення;
- 3) встановити закономірності зміни параметрів акустичних сигналів в залежності від крупності частинок в робочих зонах млина та розробити методику щодо контролю якості продуктів подрібнення.

Об'єкт дослідження – процес подрібнення і транспортування сипких матеріалів з позиції контролю їх дисперсності.

Предмет дослідження – зв'язок дисперсності матеріалу і акустичних параметрів процесу подрібнення і транспортування в потоці енергоносія.

Ідея полягає в контролі дотримання дисперсності матеріалу, що подрібнюється, без зупинки і порушення технологічного процесу на основі акустичного аналізу робочої зони.

Методи дослідження: теоретичний аналіз – для дослідження кінетичних особливостей струминного подрібнення; імітаційне моделювання – для вивчення закономірностей зменшення крупності матеріалу в замкнутому циклі; чисельні дослідження – для аналізу акустичних сигналів; експериментальні дослідження – для перевірки теоретичних положень і визначення зв'язку дисперсності матеріалів і характеристик акустичних сигналів робочих зон подрібнювальної установки.

Наукові положення, які захищаються в дисертації:

1. Під час руху газодисперсного потоку виникають акустичні сигнали, амплітудно-частотні характеристики яких однозначно пов'язані з дисперсністю твердої фази.

2. Тверда частинка певного розміру в газовому потоці генерує специфічні акустичні сигнали з характерною частотою в інтервалі 40-90 кГц, а кількість частинок характеризується дисперсією частоти і спектральною щільністю потужності сигналів.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Проведене обґрунтування використання акустичного моніторингу для визначення дисперсності матеріалу при транспортуванні в потоці газосуспензії та розроблена методика аналізу записаних акустичних сигналів склали основу контролю якості продуктів подрібнення.

2. Модифіковане інтегро-диференційне рівняння кінетики тонкого подрібнення на основі теоретичних і експериментальних досліджень зв'язує зміну гранулометричного складу матеріалу і амплітуду акустичних сигналів зони подрібнення та дозволяє за даними попереднього подрібнення з акустичним моніторингом процесу прогнозувати дисперсність продуктів подрібнення.

3. Вперше отримано експериментальні залежності характеристик акустичних сигналів, що записуються в потоці сипкого матеріалу, від дисперсності матеріалу. Показано аналогічний характер залежностей характеристик акустичних сигналів робочої зони при подрібненні і транспортуванні в потоці енергоносія від крупності матеріалу, що створило базу для контролю якості продуктів подрібнення. Побудовано нелінійну регресійну модель впливу геометричних параметрів пристрою для визначення дисперсності матеріалу в газовому потоці на амплітуду акустичних сигналів робочої зони, що дозволяє отримувати більш інформативні акустичні сигнали.

Практичне значення роботи

1. Розроблено методику визначення дисперсності суміші в потоці енергоносія за допомогою аналізу акустичних сигналів робочої зони процесу, що дозволяє на основі попереднього аналізу характеристик сигналів при транспортуванні окремих фракцій матеріалу оцінювати гранулометричний склад суміші.

2. Виконане імітаційне моделювання замкнутого циклу подрібнення показало, що для отримання заданої кількості контрольного класу необхідно контролювати процес за результатами акустичного моніторингу зони подрібнення.

3. На основі встановлення закономірності зміни параметрів акустичних сигналів в залежності від крупності частинок в робочих зонах млина розроблено спосіб та створено пристрої для реалізації методу визначення дисперсності матеріалу в потоці, що захищені патентом України (№ 114442) та патентом на корисну модель (№ 116335). Побудовано нелінійну регресійну модель, яка дозволяє встановити вплив геометричних параметрів пристрою для визначення дисперсності матеріалу в потоці на амплітуду акустичних сигналів робочої зони подрібнювальної установки. Запропоновано алгоритм та методику безперервного безконтактного контролю дисперсності продуктів подрібнення, перевірених в промислових умовах Вільногірського гірничозбагачувального комбінату, який дозволяє підвищити якість одержуваного продукту (акт випробувань від 06.06.2017 р.).

Особистий внесок автора полягає в обґрунтуванні наукового завдання, постановці мети і задач дослідження, формулювання новизни і наукових положень, розробці та створенні математичних моделей процесу подрібнення, в плануванні, проведенні експериментальних досліджень та обробці їх результатів. Обґрунтування і впровадження в промисловість теоретичних розробок і акустичного моніторингу процесу тонкого подрібнення проведено за участю автора. У статтях, опублікованих автором, відображений його особистий внесок у розробку наукових результатів. Експериментальні дослідження, які увійшли в дисертаційну роботу, виконані безпосередньо здобувачем за участю співробітників відділу термогазодинаміки енергетичних установок ІТМ НАНУ і ДКАУ. Результати опубліковані в співавторстві з ними.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати роботи доповідалися і одержали схвалення на наступних науково-технічних конференціях: «Форум гірників» (м. Дніпро, 2013, 2015, 2016 рр.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро, 2016 р.). Матеріали дисертації розглядалися на Вченій Раді ІТМ НАНУ і ДКАУ у 2017 р.

Публікації. Всього за результатами досліджень опубліковано 17 робіт, з них 14 статей у науково-технічних журналах, які входять до відповідного переліку МОН (з них 2 – у виданнях, зареєстрованих в наукометричній базі: Index Copernicus), 2 – інші наукові видання, отримано 1 патент України на винахід.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел із 100 найменувань на 10 сторінках, містить 142 сторінки тексту, в тому числі 68 малюнків, 13 таблиць, а також 6 додатків на 74 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми і наукової задачі, сформульовано мету й задачі досліджень, визначено наукову новизну й практичне значення

отриманих результатів, наведено відомості про їхню реалізацію, а також про апробацію роботи й публікації з теми дисертації.

У першому розділі проведено аналіз процесу подрібнення матеріалів й обладнання для його здійснення. Розглянуто види функції розподілу частинок за розміром, масою, вилучення корисних мінералів у потоці руди та існуючі підходи до моделювання кінетики гранулометричного складу продуктів тонкого подрібнення авторами: Андрєєва С. Е., Годена, Линча А., Перова В. А., Розіна, Раммлера, Ромашова М. П., Товарова В. В., Шумана, Младецького І. К., Пілова П. І. Разумова К. А., Шинкаренко С. Ф. Вперше найбільш повну й теоретично обґрунтовану популяційно-балансову модель кінетики подрібнення створив Загустін А. І., який описав еволюцію функції розподілу частинок за розмірами за допомогою інтегро-диференційого рівняння.

Аналіз основних напрямків визначення дисперсності, гранулометричного складу матеріалів виявив низку їх переваг та недоліків з позиції точності вимірювань. Але не розроблено методів визначення дисперсності матеріалу в потоці в ході процесу подрібнення.

В роботах Горобець Л. Ж., Прядко Н. С. на основі метода акустичної емісії було розроблено методуку запису акустичних сигналів при подрібненні сипких матеріалів, яка застосовувалась для визначення режимів подрібнення та їх оптимізації. Дослідження можливостей акустичного моніторингу показало, що взявши за основу метод акустичної емісії і методуку запису сигналів, можна його використати для рішення поставленої задачі розробки і обґрунтування акустичного контролю дисперсності продуктів подрібнення.

На основі проведеного аналізу методів контролю гранулометричного складу в процесі подрібнення, рівнянь кінетики і сучасних підходів до моделювання подрібнення були сформульовані мета і завдання дослідження.

В другому розділі вирішена перша задача досліджень, а саме обґрунтоване використання акустичного моніторингу дисперсності матеріалу при транспортуванні в потоці газосуспензії.

Відомо, що коли частинка рухається в повітряному середовищі, то перед нею утворюється фронт підвищеного тиску, а за нею – фронт зниженого тиску, таким чином, відстань у часі між цими імпульсами тиску пропорційна розміру частинок. Отже, якщо є можливість контролювати ці імпульси тиску, то тим самим можна контролювати розмір частинок у потоці, тобто їх крупність. Пристрій, що реалізує спосіб контролю крупності частинок у рухомому потоці включає в себе хвилевід, один кінець якого врівень вмонтований в трубопровід потоку частинок і має віброізоляцію, на іншому кінці хвилеводу також ізольовано змонтований датчик акустичних сигналів, з'єднаний з аналого-цифровим перетворювачем та комп'ютером. Частинки матеріалу знаходяться в турбулентному потоці, тому над хвилеводом проходять всі види частинок, тобто розподіл частинок в області сприйняття акустичних хвиль рівномірний. Таким чином, здійснюється первинне сприйняття акустичних імпульсів, які пропорційні середній крупності частинок. На цій основі була розроблена схема реєстрації і виміру акустичних сигналів під час моніторингу процесу струминного подрібнення і транспортування частинок матеріалу в потоці.

Для підтвердження зв'язків розміру частинок з амплітудою сигналів, встановлення виду залежностей і виявлення нових зв'язків акустичних характеристик з параметрами дисперсності були проведені експерименти на струминному млині ІТМ НАН України і ДКА України і на спеціальній установці, що імітує потік частинок у зоні за класифікатором млина.

За існуючою методикою обробки сигналів акустичного моніторингу струминного подрібнення обчислювався за певний час розподіл кількості сигналів з різною амплітудою і число сигналів, що характеризують режим витікання струменів без подачі матеріалу до потоку енергоносія, тобто фоновий шум. Амплітуди акустичних сигналів потоку, який не містить матеріал, складають приблизно 0,02 В у залежності від початкового тиску енергоносія (P від 0,2 до 0,5 МПа). Частка від ділення різниці загальної кількості сигналів і сигналів фонового шуму на час реєстрації визначає активність сигналів.

Для кількісного аналізу сигналів було удосконалено методику запису і обробки сигналів моніторингу процесу, обґрунтовано вибрано інтервал дискретності випробування і інтервал аналізу сигналів. При максимальній частоті запису сигналів 400 кГц розмір кроку дискретизації складатиме $\Delta t = 1$ мс, а інтервал випробування буде дорівнювати 0,1 с. Побудова автокореляційної функції випадкового процесу зміни крупності частинок в потоці енергоносія, оцінки похибки одиничного вимірювання, похибки методу показала, що з урахуванням обчислених інтервалів буде отримано задовільну оцінку середньої крупності матеріалу в потоці енергоносія в даний час.

Сигнали, записані в ході акустичного моніторингу, аналізувались та оброблялись за допомогою перетворення Фур'є. За отриманим спектром частот визначались максимальні амплітуди і характерні частоти, що притаманні певній крупності частинок. Для узагальнення результатів значення амплітуд сигналів нормувалось величиною амплітуди шуму.

Потік частинок являє собою полідисперсну систему і спектр акустичних сигналів, що видається датчиком, має складний вид. В зв'язку з цим, проведено дослідження сигналів при транспортуванні монодисперсних сумішей матеріалів. При цьому проводився аналіз спектрів частот сигналів для одержання характеристики середньої крупності частинок.

В ході проведення експериментальних досліджень подрібнення різноманітних матеріалів різної вихідної крупності були записані акустичні сигнали, які в подальшому були проаналізовані, і отримані залежності зміни нормованої амплітуди від розміру частинок матеріалу, що подрібнюється. Зокрема, для шлаку, кварцу, технічного вуглецю одержано вид рівнянь, відповідно, $\bar{A} = 6,32d - 0,84$, $\bar{A} = 1,6d + 0,023$, $\bar{A} = 0,97d + 3,75$. Високий коефіцієнт кореляції ($R = 0,98$) підтверджує встановлений зв'язок величини амплітуди сигналів і крупності матеріалу в ході подрібнення в струминному протиточному млині. Ці рівняння були використані при моделюванні кінетики подрібнення досліджуваних матеріалів. На основі встановлених залежностей запропоновано спосіб визначення гранулометричного складу суміші сипкого матеріалу в потоці при подрібненні, що оформлено патентом України (№ 114442).

Дослідження показали, що отриманий спектр частот можна умовно розділити на чотири ділянки сигналів (див. рис. 1): перша ділянка – сигнали з частотами від 0 до 40 кГц, друга – від 40 до 90 кГц; третя – від 90 до 160 кГц і четверта – від 160 кГц.

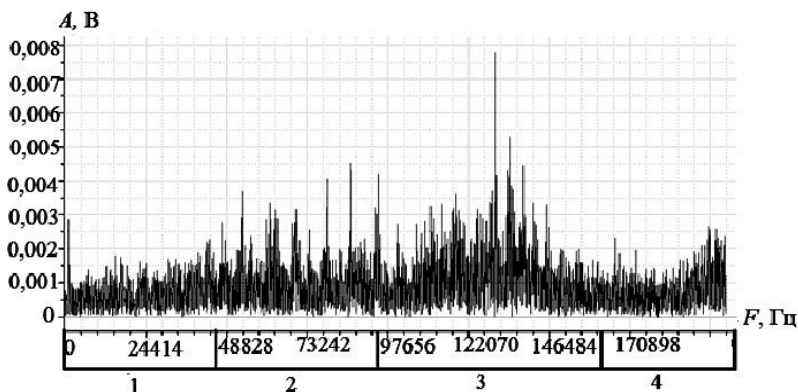


Рис. 1 Амплітудно-частотний спектр акустичних сигналів, записаних при транспортуванні суміші шамоту, крупністю менше 2,5 мм

Визначено, що інтервал 2 діапазону частот несе в собі інформацію, щодо розміру частинок матеріалу. Тому дослідження були зосереджені на сигналах з частотою від 40 до 90 кГц.

На цій основі отримано характерні частоти для вузьких фракцій матеріалів, тобто це частоти сигналів, максимальні амплітуди яких залежать від розмірів частинок.

Зокрема, розглянуто амплітудно-частотні спектри сигналів при подрібненні фракцій різних матеріалів середньою крупністю від 0,005 до 1,6 мм. Визначено характерні частоти сигналів при подрібненні вузьких фракцій різноманітних матеріалів, зокрема для фракції 0,2 мм частота становить 69 кГц, для 0,315 мм – 60 кГц, а для 0,4 мм – 78 кГц. Аналіз записаних акустичних сигналів при транспортуванні фракцій матеріалів різної крупності і щільності (шлак, кварц, шамот), показав, що характерні частоти не залежать від властивостей матеріалу і є однаковими для фракцій однієї і тієї ж крупності, але різних розглянутих матеріалів.

Проведене дослідження огинаючої стандартної щільності потужності (СЩП) для акустичних сигналів зони транспортування різних фракцій готового продукту і суміші та порівняння їх стандартного відхилення СЩП показало відносно добру кореляцію саме для фракцій з найбільшим відсотком ваги. На цій основі запропоновано розробити методику додаткового аналізу характеристик акустичних сигналів при транспортуванні готового продукту подрібнення для контролю його якості.

Дослідження, викладені в цьому розділі, підтвердили перше наукове положення, а саме, що під час руху газодисперсного потоку виникають акустичні сигнали, амплітудно-частотні характеристики яких однозначно пов'язані з дисперсністю твердої фази.

В третьому розділі вирішена друга поставлена задача, а саме на основі теоретичних і експериментальних досліджень виконано моделювання кінетики гранулометрії продуктів струминного подрібнення. Розроблено інтегро-диференційне рівняння кінетики тонкого подрібнення на базі кінетичного рівняння Загустіна (1) на основі зв'язку акустичних сигналів з розміром частинок матеріалу

$$\frac{\partial \gamma(l, t)}{\partial t} = \int_l^{l_{\max}} f(L) \gamma_{\text{втор}}(L, l) \gamma(L, l) dL - f(l) \gamma(l, t) \quad (1)$$

де $\gamma(l, t)$ – диференційна характеристика крупності матеріалу у момент часу t , см^{-1} , причому $0 < l < l_{\max}$; $f(L), f(l)$ – відносна швидкість руйнування кусків розміром L, l , відповідно, хв^{-1} ; $\gamma_{\text{втор}}(L, l)$ – диференційна характеристика крупності вторинної дрібниці, тобто матеріалу, одержуваного після руйнування початкового куска розміром L , см^{-1} , причому $0 < l < L$. Якщо відомі функції відбору $f(L)$ і функція $\gamma_{\text{втор}}(L, l)$, то за рішенням рівняння (1) можна визначити зміну в часі (кінетику) гранулометричної характеристики матеріалу, тобто функції $\gamma(l, t)$.

У загальному випадку встановлену залежність розміру частинок від нормованої максимальної амплітуди сигналів зони струминного подрібнення можна визначити рівнянням $d = a\bar{A} + b$, де коефіцієнти a, b залежать від властивостей матеріалу, а α – від характеристик процесу подрібнення. На підставі цього пропонується для тонкого подрібнення матеріалів прийняти вигляд функції відбору у формі

$$f(L) = f(L, A) = L \cdot \alpha \cdot (a\bar{A} + b). \quad (2)$$

Прийmemo для подальших міркувань, що функція руйнування має вигляд степеневі функції типу $\gamma_{\text{втор}}(L, l) = (l/L)^n$. З урахуванням встановленої залежності амплітуди акустичних сигналів від розміру частинок у потоці, використовуючи формулу (2), отримуємо функцію руйнування виду

$$\gamma_{\text{втор}}(L, l, A) = (l/L)^n = \left(\frac{aA^l + b}{aA^L + b} \right)^n. \quad (3)$$

Дослідження процесу подрібнення у млинах різного типу показали можливість опису його на основі оцінювання математичного сподівання M_x та середньоквадратичного відхилення гранулометричного складу матеріалу виду σ .

Розглянемо аналог диференційної функції крупності $\gamma(L, t)$, але у вигляді математичного сподівання та стандартного відхилення σ розподілу за крупністю, тобто у цьому випадку функції руйнування мають вигляд

$$\begin{aligned} \gamma(L, t) = M(L, t) &= \alpha_1 t^2 + \alpha_2 t + \alpha_3, \\ \gamma(l, t) = \sigma(l, t) &= b_1 t^2 + b_2 t + b_3. \end{aligned} \quad (4)$$

Перейдемо до інтегро-диференційного рівняння (1). Підставляємо у (1) отримані значення функцій, що входять у загальний вигляд рівняння із (2)-(4). Позначаючи вираз перед інтегралом як коефіцієнт C , а вираз перед останнім правим членом C_l , де

$$C = \alpha \cdot (a\bar{A} + b) \left(\frac{aA^l + b}{aA^L + b} \right)^n, \quad C_l = \alpha \cdot (a\bar{A}_l + b), \quad (5)$$

отримуємо остаточний вигляд інтегро-диференційного рівняння кінетики тонкого подрібнення

$$\frac{\partial \gamma(l, t)}{\partial t} = C \int_l^{l_{\max}} LM(L, t) dL - lC_l \sigma(l, t) \quad (6)$$

Фізичний сенс рівняння (6) наступний: швидкість зміни частки вузького класу $\frac{\partial \gamma(l, t)}{\partial t}$ дорівнює різниці притоку до нього з більших ($L > l$) класів, яка оцінюється інтегралом у правій частині та відтоку із нього у більш дрібні класи, який оцінюється останнім членом правої частини рівняння.

Проведено порівняння гранулометричного складу по залишкам на ситі кінетики фракції (-1 + 0,63 мм) шамоту на основі розрахунків за формулою (6) та експериментальними даними, при цьому похибка становить 3-7 %.

Модифікація рівняння Загустіна (1) у вигляді (6) за результатами акустичного моніторингу процесу дало можливість на основі отриманих попередніх даних визначити склад досліджуваної фракції матеріалу у будь-який момент подрібнення і тим самим прогнозувати якість продукту подрібнення.

На прикладі надтонкого подрібнення шлаку в струминному млині розглянута кінетика гранулометричного складу продукту подрібнення з масо енергетичних позицій, що дозволило встановити в разі, коли приймається гіпотеза про пропорційний розподіл енергії між фракціями продукту згідно їх масі, функція розподілу енергії між фракціями є постійною і її значення не змінюється в процесі подрібнення. Це суперечить експериментальним даним, бо в ході подрібнення питома поверхня фракцій змінюється, і енергія, необхідна для їх подрібнення теж змінюється. Отже, доведено, що енергія, яка витрачається на тонке подрібнення, не пропорційна масі фракцій одержаного продукту.

Це вирішує другий пункт другої поставленої задачі та дозволяє на базі цих одержаних наукових знань про особливості тонкого подрібнення і зв'язок кінетики гранулометричного складу з результатами акустичного моніторингу процесу подрібнення побудувати імітаційну модель процесу струминного подрібнення у замкнутому циклі для створення алгоритму контролю дисперсності подрібненого продукту.

Дослідження показали можливість адекватного опису процесу подрібнення в замкнутій системі на основі комплексного моделювання всієї системи подрібнення і динамічного моделювання кінетики подрібнення фракцій матеріалу в помольній камері. При дослідженнях другої частини є можливість визначити час подрібнення для заданого виходу контрольного класу за результатами акустичного моніторингу процесу і базі встановлених зв'язків характеристик акустичних сигналів з дисперсністю продуктів. Це дозволило розробити алгоритм контролю дисперсності подрібненого продукту.

В четвертому розділі вирішена третя поставлена задача, яка полягає у встановленні закономірності зміни параметрів акустичних сигналів в залежності від крупності частинок в робочих зонах млина та розробці методики щодо контролю якості продуктів подрібнення.

Для імітації процесів в зоні за класифікатором і оцінки дисперсності матеріалів в газовому потоці розроблено експериментальні установки (рис. 2) і проведені експериментальні дослідження та на основі методики, описаної в 2 розділі, проаналізовані акустичні сигнали, отримані в процесі експериментів. Для більш точного визначення гранулометричного складу сипких матеріалів в потоці без порушень властивостей матеріалу установка для оцінки дисперсності матеріалів в газовому потоці була удосконалена з урахуванням впливу сил тяжіння на частинки (рис. 2 б), а саме в потік була встановлена зносостійка пластина, яка дозволяє розширити віяло частинок і більш точно вловити акустичні сигнали.

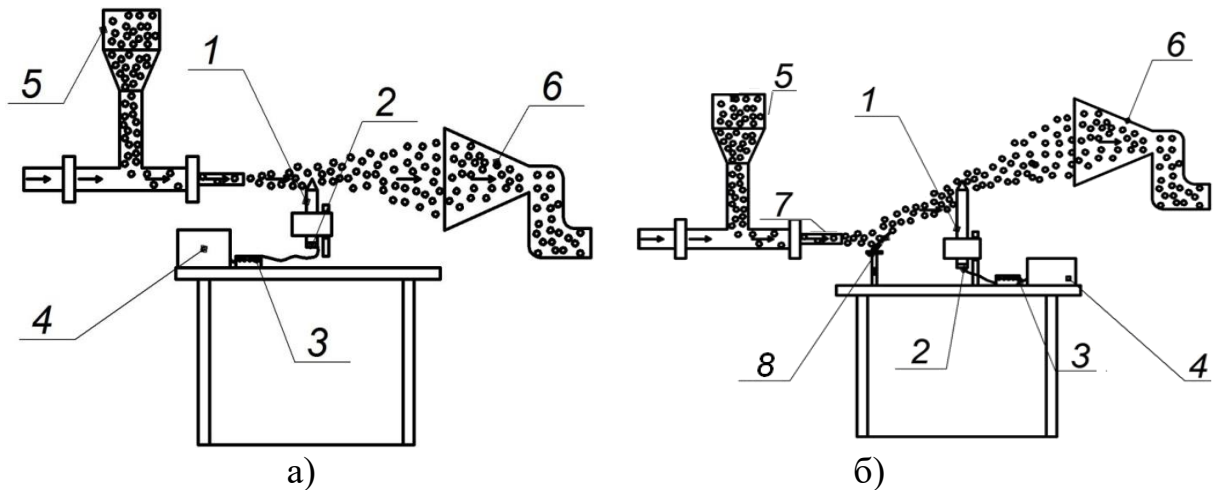


Рис. 2. Схема установок для оцінки дисперсності матеріалів в газовому потоці «Гранулометр -1» (а) і «Гранулометр -2» (б):

1 – хвилевід; 2 – п'єзокерамічний датчик; 3 – аналого-цифровий перетворювач; 4 – комп'ютер; 5 – завантажувальний бункер; 6 – бункеруловлювач, 7 – розгінна трубка, 8 – пластина.

Проведені експериментальні дослідження процесу транспортування матеріалів різних властивостей (кварц, шлак, шамот) на експериментальних установках для оцінки дисперсності матеріалів в газовому потоці встановили залежності величини амплітуди від розміру частинок, що транспортуються та підтвердили виявлену раніше лінійну залежність цих параметрів, на що вказують високі коефіцієнти кореляції ($R = 0,98$). Результати досліджень підтвердили незалежність характерних частот акустичних сигналів від типу установки, але встановлено, що величина амплітуд сигналів характерних частот на установці «Гранулометр-2» в два рази менше. Вважаємо, що цей факт пояснюється відсутністю накладення сигналів від частинок різних розмірів, що транспортуються в потоці. Це дозволяє підвищити точність визначення наявності частинок вузьких фракцій в матеріалі, який транспортується в потоці енергоносія.

Проаналізовано спектр частот сигналів при транспортуванні шлаку, шамоту, кварцового піску різної крупності, отримані дані наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Акустичні параметри сигналів, записані під час транспортування в потоці енергоносія вузьких фракцій сипких 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

З метою удосконалення установки для оцінки дисперсності матеріалів в газовому потоці з урахуванням впливу геометричних параметрів, розроблена багатофакторна регресійна модель. Для оцінки дисперсності матеріалів в газовому потоці експериментально отримано низку залежностей нормованої максимальної амплітуди \bar{A} від геометричних параметрів: відстані l_m від зрізу розгінної трубки до пластини; відстані L_b від пластини до хвилеводу; кута нахилу пластини α ; висоти h розташування хвилеводу, щодо нижнього краю розгінної трубки. Це – основні фактори впливу при оцінці дисперсності матеріалу на розглянутому пристрої. Функцією відгуку регресійної моделі є нормовані максимальні амплітуди \bar{A} сигналів, що записуються при транспортуванні продукту, від кожного фактора або від комплексу факторів впливу.

Узагальнені регресійні залежності зміни нормованої максимальної амплітуди \bar{A} від чотирьох варійованих факторів для розрахунку задавалися у вигляді поліному другого ступеня з урахуванням взаємного впливу змінних

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i \cdot x_i + \sum_i^n a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (7)$$

де Y – функція відгуку (\bar{A}); a_0 – вільний член рівняння; $a_i \cdot x_i$, $a_{ii} \cdot x_i^2$ – лінійні і квадратичні складові; $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ – складові парних добутків факторів; $n = 4$ – число змінних факторів. Коефіцієнти заданої залежності визначалися методом найменших квадратів засобами прикладного пакету обробки статистичних даних Statgraphics Plus. Після кожного циклу оцінювалася адекватність F (статистика Фішера) отриманої моделі експериментальним даним. Обчислювався коефіцієнт детермінації R . В результаті розрахунку була встановлена узагальнена регресійна залежність нормованої максимальної амплітуди сигналів, що записуються, при транспортуванні продукту, від чотирьох змінних параметрів. Наприклад, для суміші кварцового піску Вільногірського родовища вихідної крупності менше 1,0 мм:

$$\begin{aligned} \bar{A} = & 138 - 6,70833 \cdot L_b - 3,04167 \cdot l_m + 7,79167 \cdot h + 21,7917 \cdot \alpha - \\ & - 6,59375 \cdot L_b^2 - 1,1875 \cdot L_b \cdot l_m - 0,4375 \cdot L_b \cdot h - 2,3125 \cdot L_b \cdot \alpha - \\ & - 3,21875 \cdot l_m^2 - 1,5625 \cdot l_m \cdot h - 1,4375 \cdot l_m \cdot \alpha - 7,21875 \cdot h^2 + \\ & + 2,8125 \cdot h \cdot \alpha - 3,09375 \cdot \alpha^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Ця регресійна залежність в межах досліджуваних параметрів має коефіцієнт детермінації $R = 0,9$, який показує, що мінливість функції \bar{A} на 90 % пояснюється впливом врахованих в моделі факторів.

При розрахунку парних регресійних залежностей варіювався кожен із чотирьох параметрів при фіксованих значеннях інших змінних, які приймалися рівними їх середнім значенням, тобто рівні відповідних факторів приймалися рівними 0. На рис. 3 представлені тривимірні графіки залежностей \bar{A} від розглянутих факторів.

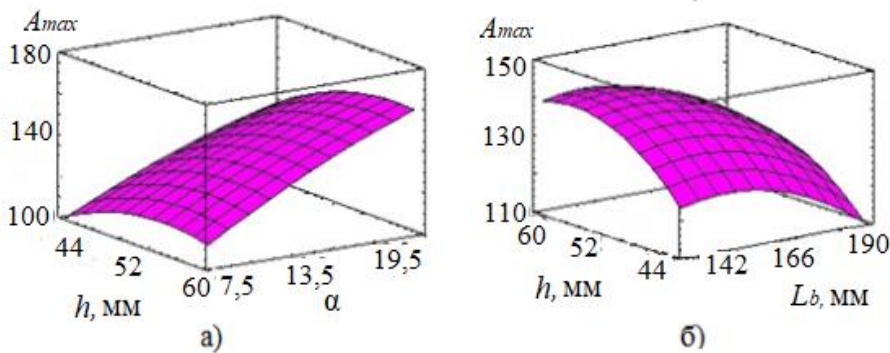


Рис. 3. Поверхня відгуку A_{max} при :
а) $L_b = 0$ і $l_m = 0$; б) $\alpha = 0$ і $l_m = 0$.

Визначено, що для отримання значень \bar{A} , характерних для досліджуваних фракцій матеріалу, необхідно використати наступні величини факторів:

$$L_b = 139 \text{ мм};$$

$$l_m = 141 \text{ мм}; h = 60 \text{ мм};$$

$$\alpha = 30^\circ.$$

Встановлено, що отримані регресійні за-

лежності впливу кожного прийнятого фактора на нормовану максимальну амплітуду \bar{A} акустичних сигналів, адекватно описують характер впливу на процес запису акустичних сигналів і можуть бути використані при експериментальних дослідженнях на установці для оцінки дисперсності матеріалів в газовому потоці. Але для контролю якості продуктів подрібнення важливо знати не лише фракційний склад, але й кількість наявних в суміші фракцій матеріалу. Для цього проведено аналіз дисперсії отриманої характерної частоти.

Проведено дослідження дисперсії характерних частот акустичних сигналів для вузьких класів крупності. Отримано залежності дисперсії від виходу класу крупності. Аналіз результатів дозволив встановити існуючу залежність дисперсії характерної частоти акустичних сигналів від маси відповідної фракції в суміші при транспортуванні матеріалу в потоці. Слід зазначити, що кут нахилу прямих $a = \bar{f}' = \frac{df}{d\beta}$ має одне і те ж значення для фракцій однакової крупності різних матеріалів, тобто є ознакою крупності частинок фракції (рис. 4).

Експериментальними дослідженнями встановлено залежність дисперсії характерних частот від маси частинок і розміру фракції в суміші, що дозволяє безконтактно визначати гранулометричний склад матеріалу в газовому потоці.

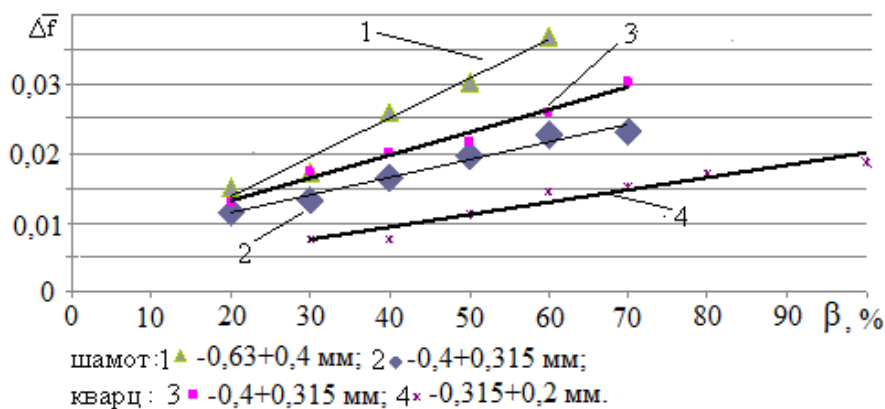


Рис. 4. Нормована дисперсія частоти сигналів при транспортуванні різної маси фракцій шамоту і кварцового піску

класів гранулометричного складу концентрату магнетитового кварциту після третьої стадії подрібнення в кульовому млині.

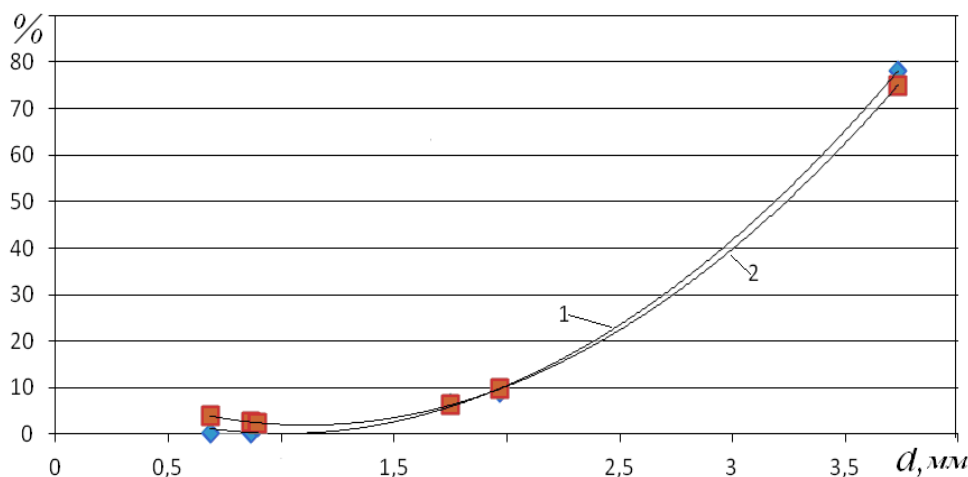


Рис. 5. Порівняння експериментальних (1) і розрахункових (2) значень вмісту фракцій в суміші концентрату.

прогнозування гранулометричного складу матеріалу в потоці за попередніми результатами акустичного моніторингу заданого матеріалу в потоці.

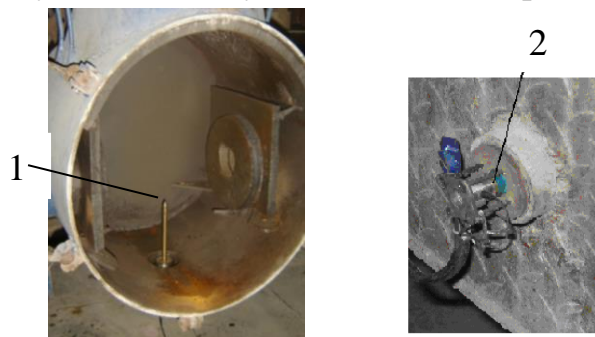


Рис. 6. Установка системи акустичного моніторингу на промисловому млині УСІ-2000 в помольній камері (а) і на виході з класифікатора (б); 1 – хвилевод, 2 – датчик.

На цій основі було проведено експериментальне дослідження, яке полягало в прогнозуванні гранулометричного складу продукту подрібнення. На рис. 5 представлені криві розрахункових і експериментально визначених значень

Дослідження показали хороший збіг (похибка $R^2 = 0,99$) розрахункових значень вмісту вузьких фракцій в концентраті з експериментальними.

Отже за допомогою обчислення дисперсії характерних частот акустичних сигналів можливе

Одержані теоретичні і експериментальні результати перевірені в умовах Вільногірського гірничо-металургійного комбінату при використанні в якості енергоносія стисненого повітря тиском $P \leq 0,6$ МПа. Проведено подрібнення цирконового концентрату початковою дисперсністю 63,5 % менше 0,16 мм. На рис. 6 наведена установка акустичної апаратури на промисловому струминному млині.

Згідно технологічних умов струминного подрібнення у Вільногірському гірничо-збагачувальному комбінаті необхідно отримувати продукт (цирконовий концентрат) крупністю –63 та –45 мкм з допустимим залишком на відповідній ситі 1-1,5 %. Тому при акустичному моніторингу якості продуктів струминного подрібнення в промислових умовах достатньо контролювати появу частинок розміром більше, ніж 63 або 45 мкм відповідно. У зв'язку з цим проводиться аналіз зв'язку крупності частинок контрольних класів і акустичних сигналів.

Аналіз сигналів, записаних під час транспортування матеріалу в зоні за класифікатором, дозволив отримати гістограми для продукту різної якості (рис. 7). Дослідження акустичних параметрів сигналів робочих зон виявили допустимий їх діапазон для отримання технологічно обґрунтованої якості продукту.

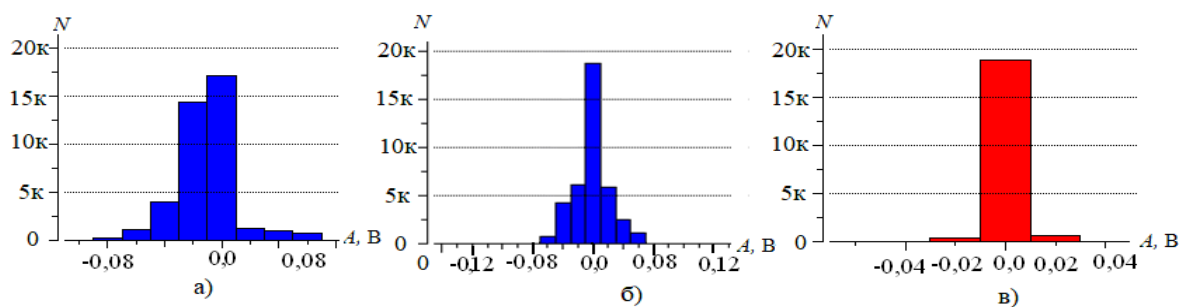


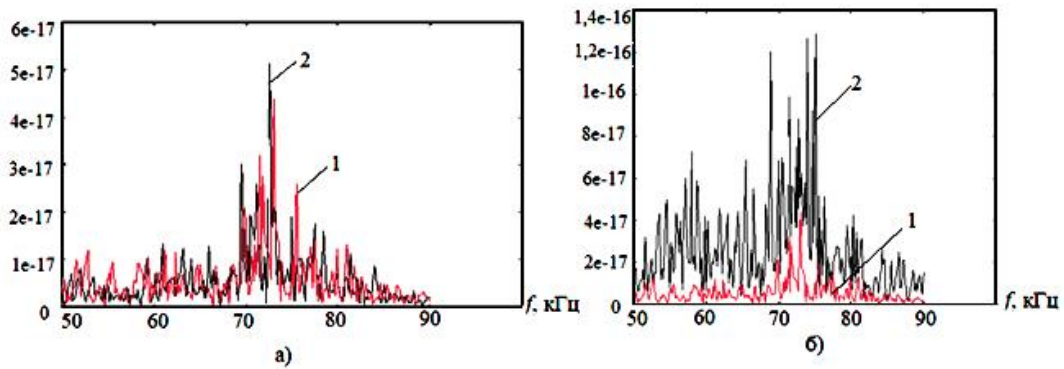
Рис. 7. Гістограма для готового продукту при залишку на ситі:
а) 9,7 %; б) 4 %; в) 0,05 %.

Залежність максимальних амплітуд від кількісного визначення порушень якості продукту, тобто від величини залишку на ситі в % має вираз (з коефіцієнтом кореляції 0,988) $A = -0,0008r^2 + 0,015r + 0,016$, де r – залишок на ситі, %.

Водночас визначено допустимі значення максимальної амплітуди акустичних сигналів для отримання якісного продукту. Амплітуда акустичних сигналів зони транспортування, записаних при одержанні продукту класу –63 мкм з якістю не більше 2,5 % залишку на ситі, не повинна відхилятися від нормативного (встановленого) рівня більш ніж на 30 %.

Однак для визначення фракційного складу суміші недостатньо аналізу тільки амплітудних характеристик сигналів. Необхідно визначити частотні характеристики акустичних сигналів і їх зміни при транспортуванні сумішей матеріалів. На основі цього розроблено алгоритм і методику акустогазодинамічного аналізу продуктів тонкого подрібнення, що включає візуальне спостереження акустичних сигналів оператором і додатковий комплекс аналізу акустичних сигналів для уточнення результатів моніторингу (визначення наявних характерних частот сигналів та обчислення їх дисперсії).

На базі проведених досліджень контроль якості продуктів подрібнення можливий за рахунок порівняння СЩП сигналів, отриманих у ході транспортування готового продукту відмінної якості (еталонні сигнали) з поточними значеннями, які зображені на рис. 8.



- 1 – СЩП сигналу при ідеальній якості готового продукту;
 2 – СЩП сигналу у поточний момент часу.

Рис. 8. Спектральна щільність потужності сигналів при:
 а) допустимому відхиленні якості подрібненого матеріалу;
 б) недопустимому відхиленні якості подрібненого матеріалу.

Методика цього підходу до контролю якості продуктів подрібнення складається з визначення і накладення СЩП поточного запису на СЩП запису ідеальних сигналів допустимої якості. Різниця цих обчислень досить велика при розходженні якості продукту навіть на 1 %, тому результат можна оцінювати графічно on-line на екрані монітора підчас акустичного моніторингу. Як видно з наведених рисунків, за допомогою порівняння отриманих у даний час СЩП сигналів, можливо контролювати якість готового продукту подрібнення, що дозволяє своєчасно виявити наявність браку у готовому продукті і змінити технологічні параметри процесу подрібнення.

На основі впровадження методики контролю якості продуктів подрібнення в промислових умовах можливо прискорити процес визначення крупності готового продукту за рахунок акустичного моніторингу з 30 до 1 хв. Це дозволить забезпечити підвищення якості готового продукту та економію електроенергії, яку було б необхідно витратити для повторної переробки продукту.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена важлива наукова задача розробки і обґрунтування акустичного контролю дисперсності продуктів подрібнення на основі залежностей акустичних параметрів сигналів від крупності матеріалів. Розроблена методика контролю якості продуктів подрібнення в режимі on-line дозволяє своєчасно виявити неприпустиму крупність подрібненого продукту та виключити надмірне подрібнення і перевитрату електричної енергії.

Найбільш важливі наукові і прикладні результати, висновки і рекомендації полягають в наступному.

1. На основі виконаного аналізу існуючих способів визначення гранулометричного складу матеріалу подрібнення та недоліків цих способів було зроблено висновок щодо необхідності ефективного контролю якості подрібнювального матеріалу, це може бути досягнуто за допомогою своєчасного контролю розподілу частинок за розмірами після стадії подрібнення, що

дозволить отримувати зразки з гранулометричним складом, які найкращим чином підходять для подальшої обробки.

2. Дослідженням фізичної моделі акустичного моніторингу процесу подрібнення і транспортування матеріалу в потоці встановлено інтервал дискретності та необхідний інтервал аналізу сигналів. Встановлена залежність частоти акустичних сигналів від крупності частинок матеріалу і визначено інтервал інформаційних частот (від 40 до 90 кГц) щодо розміру частинок матеріалу. Визначено характерні частоти сигналів для вузьких фракцій різних матеріалів при подрібненні та транспортуванні матеріалів в потоці.

3. Розроблене інтегро-диференційне рівняння кінетики тонкого подрібнення на основі зв'язку акустичних сигналів з розміром частинок матеріалу дозволяє на основі отриманих попередніх даних визначити склад досліджуваної фракції матеріалу у будь-який момент подрібнення і тим самим прогнозувати якість продукту подрібнення. Показана непропорційність розподілу енергії між фракціями продукту їх масі для надтонкого подрібнення.

4. Експериментально встановлено залежність дисперсії характерних частот від маси частинок і розміру фракції в суміші, що дозволяє безконтактно визначати гранулометричний склад матеріалу в газовому потоці. На цій базі проведено прогнозування гранулометричного складу матеріалу в потоці за попередніми результатами акустичного моніторингу транспортування заданого матеріалу. Розглянуті промпродукти, концентрати, продукти подрібнення різних видів млинів і різних стадій подрібнення.

5. Створено експериментальну установку для визначення гранулометричного складу матеріалу, що транспортується в потоці і регресійним аналізом визначено необхідні геометричні характеристики створеної установки ($L_b = 139$ мм; $l_m = 141$ мм; $h = 60$ мм; $\alpha = 30^\circ$).

6. Виявлений допустимий діапазон коливань акустичних сигналів зони подрібнення промислового млина для отримання технологічно обґрунтованої якості продукту. Впровадження розробленої методики контролю якості подрібненого продукту і додатковий комплекс аналізу стандартного відхилення огинаючої спектральної щільності потужності акустичних сигналів робочих зон значно (до 30 раз) прискорює процес визначення крупності готового продукту в потоці. Це дозволить забезпечити підвищення якості готового продукту та економію електроенергії при подрібненні без повторної переробки продукту.

Список публікацій здобувача

Статті у фахових виданнях:

1. Терновая Е. В. Имитационная модель замкнутого цикла измельчения минерального сырья / Г. М. Саксонов, Н. С. Прядко, Е. В. Терновая // Системные технологии: региональный межвузовский сборник научных трудов. – 2014. – № 3 (92). – С. 19 – 25 (Index Copernicus).

2. Терновая Е. В. Определение гранулометрического состава материала в потоке воздуха с использованием диаграмм Пуанкаре / А. И. Михалев, А. И. Гуда, Н. С. Прядко, Р. А. Сухомлин, Е. В. Терновая // Системные технологии. Региональный

межвузовский сборник научных работ. – 2016. – № 4 (105). – С. 18 – 24 (Index Soreticus).

3. Терновая Е. В. Имитационная модель кинетики тонкого измельчения материалов / Г. М. Саксонов, Н. С. Прядко, Е. В. Терновая // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – № 53 (1095). – С. 89 – 97.

4. Терновая Е. В. Оценка скорости тонкого измельчения руд мельницами различных типов / Н. С. Прядко, Г. А. Стрельников, Е. В. Терновая, В. А. Грушко, Н. Ю. Пясецкий // Техническая механика. – 2014. – №3. – С. 114 – 121.

5. Терновая Е. В. О кинетике измельчения отдельных фракций в смеси / П. И. Пилов, Н. С. Прядко, Е. В. Терновая // Збагачення корисних копалин. – 2014. – №57 (98). – С. 101 – 106.

6. Терновая Е. В. Оценка современных способов гранулометрического анализа измельченного продукта / Е. В. Терновая // Збагачення корисних копалин. – 2014. – № 58 (99) – 59 (100). – С. 71 – 78.

7. Терновая Е. В. Акустические характеристики внутренних полостей помольной камеры струйного измельчения / Н. С. Прядко, Е. В. Терновая // Техническая механика. – 2015. – № 2. – С. – 110 – 117.

8. Терновая Е. В. Кинетика фракционного состава при струйном измельчении / Н. С. Прядко, Е. В. Терновая // Збагачення корисних копалин. – 2015. – № 60 (101). – С. 74 – 80.

9. Терновая Е. В. Анализ частот сигналов при транспортировании и измельчении сыпучих материалов в потоке / Е. В. Терновая // Збагачення корисних копалин. – 2016. – № 63 (104). – С. 59 – 65.

10. Терновая Е. В. Экспериментальные исследования характеристик акустических сигналов при транспортировании материалов в установках «Гранулометр» / Н. С. Прядко, Е. В. Терновая // Збагачення корисних копалин. – 2016. – № 64 (105). – С. 111 – 118.

11. Терновая Е. В. Интегро-дифференциальное уравнение кинетики тонкого измельчения / Н. С. Прядко, Е. В. Терновая // Техническая механика. – 2016. – № 4. – С. 104 – 112.

12. Терновая Е. В. Разработка модели установки для определения дисперсности материала в потоке энергоносителя на основе регрессионного анализа / Е. В. Терновая // Техническая механика. – 2017. – № 1. – С. 100 – 106.

13. Терновая Е. В. Установление возможности оценки фракционного состава сыпучих материалов по частотным характеристикам акустических сигналов в потоке / Е. В. Терновая, Н. С. Прядко // Збагачення корисних копалин. – 2017. – № 67 (108). – С. 161 – 168.

14. Тернова К. В. Дослідження можливості використання декомпозиції SSA для оцінювання гранулометричного складу матеріалу / Р. О. Сухомлин, О. І. Михальов, Н. С. Прядко, К. В. Тернова // ВІСНИК ХНТУ. – 2017. – №3 (62). – ТОМ 1. – С. 228 – 232.

Патент:

15. Патент на винахід № 114442 Спосіб визначення гранулометричного складу сипучого матеріалу в потоці в процесі подрібнення / Пілов П. І., Горобець Л. Ж., Прядко Н. С., Тернова К. В.; заявник і патентоволодар Інститут технічної

механіки НАНУ і ДКАУ. – а 2015 07099, опубл. 16.07.2015; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11. – 6 с.

Статті у інших виданнях:

16. Терновая Е. В. Аэроакустика помольных камер различного типоразмера / Е. В. Терновая, Н. С. Прядко // Збагачення корисних копалин. – 2013. – № 55 (96). – С. 27 – 32.

17. Терновая Е. В. Влияние размера частиц газодисперсных потоков на амплитуду акустических сигналов / Е. В. Терновая // Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація. – 2016. – № 1 (1). – С. 70 – 73.

Внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві: основи моделювання різних схем замкнутого циклу подрібнення наведено у [1, 3], розроблено динамічну модель подрібнення в замкнутому циклі, розглянуто перехід з однієї фракції в іншу. У статтях [4, 5, 8, 11] розглянуто кінетику подрібнення різних матеріалів. Залежність характеристик акустичних сигналів від дисперсності продукту подрібнення показано експериментально в статті [10]. У роботах [2, 13, 14] проведено та оброблено експериментальні дослідження щодо встановлення зв'язків технологічних і акустичних параметрів та визначення характерних частот. Розглянуто особливості акустичного моніторингу для струминних млинів різних розмірів [7, 16]. Розробка способу визначення гранулометричного складу суміші сипучого матеріалу в потоці проведена в [15].

АНОТАЦІЯ

Тернова Катерина Віталіївна. Обґрунтування акустичного контролю дисперсності продуктів подрібнення. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.08 – «Збагачення корисних копалин». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена обґрунтуванню акустичного контролю дисперсності продуктів подрібнення корисних копалин на основі зв'язку технологічних і акустичних параметрів процесу.

Виходячи з аналізу існуючих способів за визначенням дисперсності матеріалів, що подрібнюються, виявлено низку їх недоліків, пов'язаних з тривалістю проведення аналізу, великою похибкою і т. д. Проведено обґрунтування використання акустичного моніторингу дисперсності матеріалу при транспортуванні в потоці газосуспензії. Розглянуто існуючі рівняння кінетики і підходи до моделювання кінетики подрібнення сипких матеріалів. Проведено дослідження кінетики гранулометричного складу продуктів подрібнення з масо енергетичних позицій. Отримано модифікований вид інтегро-диференційного рівняння кінетики тонкого подрібнення руд. Проведено імітаційне моделювання процесу подрібнення і динамічне моделювання кінетики подрібнення. Проведено низку експериментальних досліджень процесу подрібнення різних матеріалів, які дозволили встановити закономірність зміни характеристик акустичних сигналів, що записуються при подрібненні матеріалів різної вихідної дисперсності і

отриманих продуктів різної тонини. Встановлено характерні частоти для вузьких фракцій матеріалів. Розроблено експериментальні установки «Гранулометр-1,2» для аналізу гранулометричного складу матеріалів в потоці. Проведено регресійний аналіз для удосконалення конструкції експериментальної установки з урахуванням впливу геометричних параметрів. Розроблено методику контролю якості подрібненого продукту, яка включає візуальне спостереження акустичних сигналів оператором і додатковий комплекс аналізу акустичних сигналів для уточнення результатів моніторингу. Це прискорить процес визначення крупності готового продукту за рахунок акустичного моніторингу з 30 хв до 1 хв, дозволить забезпечити підвищення якості готового продукту і економію електроенергії при виключенні повторної переробки.

Ключові слова: тонке подрібнення, акустичні сигнали, моніторинг, дисперсність, кінетика, гранулометричний склад.

АННОТАЦІЯ

Терновая Екатерина Витальевна. Обоснование акустического контроля дисперсности продуктов измельчения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.15.08 – «Обогащение полезных ископаемых». – Национальный технический университет «Днепровская политехника», г. Днепр, 2018.

Диссертация посвящена обоснованию акустического контроля дисперсности продуктов измельчения полезных ископаемых на основе связи технологических и акустических параметров процесса.

Анализ существующих способов определения гранулометрического состава и дисперсности материалов показал ряд недостатков (длительность проведения анализа, возможность контроля дисперсности только в потоке пульпы и т. д.). Проведено обоснование использования акустического мониторинга дисперсности материала при транспортировке в потоке газозвеси. В ходе проведения экспериментальных исследований были получены записи акустических сигналов, далее на основе метода Фурье проводился анализ амплитуд, спектров частот сигналов. Исследования показали, что полученный спектр частот можно условно разделить на 4 участка сигналов: 1 участок – сигналы с частотами от 0 до 40 кГц, 2 участок имеет отдельные всплески амплитуд при частотах от 40 до 90 кГц, 3 участок имеет широкий диапазон частот от 90 до 160 кГц и 4 участок – сигналы с частотами выше 160 кГц. На этом основании определен интервал частот, который несет в себе информацию относительно размера частиц материала, который находится в диапазоне от 40 до 90 кГц. Рассмотрены существующие уравнения кинетики и подходы к моделированию кинетики измельчения сыпучих материалов. Проведено исследование кинетики гранулометрического состава продукта измельчения с массо- энергетических позиций. Получен модифицированный вид интегро-дифференциального уравнения кинетики тонкого измельчения руд на основе связи акустических сигналов с размером частиц материала, что позволило на основе полученных предварительных данных

определить состав исследуемой фракции материала в любой момент измельчения и тем самым прогнозировать качество продукта измельчения. Проведено имитационное моделирование процесса измельчения и динамическое моделирование кинетики измельчения. Проведен ряд экспериментальных исследований процесса измельчения различных материалов, которые позволили установить закономерность изменения характеристик акустических сигналов, записываемых при измельчении материалов различной исходной дисперсности и полученных продуктов разной тонины. Установлены характерные частоты для узких фракций материалов. Разработаны экспериментальные установки «Гранулометр-1» и «Гранулометр-2» для анализа гранулометрического состава материалов в потоке. Анализ полученных записей акустических сигналов и их характеристик позволил определить характерные частоты для узких фракций различных материалов: для фракции 0,2 мм частота составляет 69 кГц, для 0,315 мм – 60 кГц, а для 0,4 мм – 78 кГц. Проведен регрессионный анализ для усовершенствования конструкции экспериментальной установки с учетом влияния геометрических параметров. Проведено исследование дисперсии характерных частот акустических сигналов для узких классов крупности. Получены зависимости дисперсии от выхода класса крупности. В результате экспериментальных исследований установлена зависимость дисперсии характерных частот от массы частиц и размера фракции в смеси, которая позволяет бесконтактно определять гранулометрический состав материала в газовом потоке. Проведенное исследование стандартного отклонения огибающей спектральной плотности мощности для акустических сигналов зоны транспортировки различных фракций готового продукта и смеси стало основой методики дополнительного анализа характеристик акустических сигналов при транспортировке готового продукта измельчения для контроля его качества. Показано, что с помощью сравнения спектральной плотности мощности эталонных и полученных в процессе измельчения сигналов можно, контролируя качество готового продукта измельчения, своевременно выявить наличие материала недопустимой крупности и изменить технологические параметры процесса измельчения. Разработана методика контроля качества измельченного продукта, которая включает визуальное наблюдение акустических сигналов оператором и дополнительный комплекс анализа акустических сигналов для уточнения результатов мониторинга. Это ускорит процесс определения крупности готового продукта за счет акустического мониторинга с 30 мин до 1 мин, позволит обеспечить повышение качества готового продукта и экономию электроэнергии при исключении повторной переработки продукта.

Ключевые слова: тонкое измельчение, акустические сигналы, мониторинг, дисперсность, кинетика, гранулометрический состав.

THE SUMMARY

Ternovaya Ekaterina Vitalevna. An acoustic monitoring justification of grinding material dispersion. – Manuscript.

The thesis on acquirement of a scientific degree of candidate of technical sciences on a specialty 05.15.08 – «Mineral processing». – National technical university «Dnipro Polytechnic», Dnepr, 2018.

The thesis is devoted to the acoustic monitoring justification of grinding material dispersion on the basis of connection of the process technological and acoustic parameters.

Having examined the existing methods for analyzing the size composition and dispersity of materials, it was revealed that they have a number of drawbacks (the Justification of use of acoustic monitoring of dispersion of material when transporting in a gas-suspension stream is carried out. The analysis of the obtained results of acoustic signals and their characteristics made it possible to determine the characteristic frequencies for narrow fractions of various materials. Existing equations of kinetics and approaches to modeling the kinetics of grinding of bulk materials are considered. The kinetics of the size composition of the grinding product from mass-energy positions was studied. A modified form of the integro-differential equation of the kinetics of fine ore grinding is obtained. Simulation modeling of grinding process and dynamic modeling of shredding kinetics are carried out. A number of experimental studies of the grinding process of various materials have been carried out, which have made it possible to establish the regularity of the changes in the characteristics of acoustic signals recorded by grinding materials of different initial dispersity and products of different fineness. The characteristic frequencies for narrow fractions of materials are established. The experimental setups «Granulometer-1,2» were developed to analyze the size composition of materials in the stream. Regression analysis was performed to improve the design of the experimental setup, taking into account the influence of geometric parameters. The quality control system of the crushed product is developed, which includes visual observation of acoustic signals by the operator and an additional complex of analysis of acoustic signals to refine the monitoring results, which will accelerate the process of determining the fineness of the finished product through acoustic monitoring from 30 minutes to 1 minute. That will ensure the improvement of the ready product quality and the saving of electricity without re-processing of the product.

Key words: fine grinding, acoustic signals, monitoring, dispersion, kinetics, size composition.