

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

ПРЯДКО НАТАЛІЯ СЕРГІЇВНА

УДК 622.7:622.73

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТОНКОГО ПОДРІБНЕННЯ
КОРИСНИХ КОПАЛИН**

Спеціальність 05.15.08 – «Збагачення корисних копалин»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі термогазодинаміки енергетичних установок Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державної космічної агенції України (м. Дніпропетровськ).

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Пілов Петро Іванович,
Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет»
Міністерства освіти і науки України
(м. Дніпропетровськ),
перший проректор, завідувач кафедри
збагачення корисних копалин.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор
Губін Георгій Вікторович,
Державний вищий навчальний заклад
«Криворізький національний університет»
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри рудотермічних процесів;
– доктор технічних наук, професор
Надугий Володимир Петрович,
Інститут геотехнічної механіки
ім. М.С. Полякова
Національної академії наук України
(м. Дніпропетровськ),
завідувач відділу механіки машин і процесів
переробки мінеральної сировини;
– доктор технічних наук, професор
Сокур Микола Іванович,
Кременчуцький національний університет
ім. М. Остроградського
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри маркетингу.

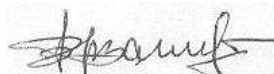
Захист відбудеться “ ” грудня 2015 г. о годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.02 при Державному ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

Автореферат розісланий “ ” листопада 2015 г.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.02,

к.т.н., доцент



В.В. Панченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процеси подрібнення використовуються для підготовки мінеральної сировини до переробки в гірничій, хімічній промисловості, у порошковій металургії, виробництві будівельних матеріалів, скла, пластмас, кераміки, твердих палив й інших видів тонкодисперсних матеріалів.

Як відомо, тонке подрібнення дуже енергоємний процес. Так, у цементній промисловості при одержанні 1 т цементу на подрібнення сировини витрачається 50 – 60 кВт-г, що становить 50% загальної кількості енергії на його виробництво. В останні роки розвиток промисловості вимагає виробництва продуктів тонкого (менш 20 мкм) і надтонкого (менш 7 мкм) подрібнення, що обумовлює подальше зростання необхідної енергії на одиницю виробленої продукції. Попит на підвищення дисперсності матеріалів призводить до необхідності удосконалення існуючого та створення нового обладнання, технологій для тонкого й надтонкого подрібнення. Цей процес стримується відсутністю теоретичного обґрунтування вибору оптимальних режимів подрібнення, методик і наукових способів контролю дисперсності продукту, що не дозволяє суттєво знизити енергоємність процесу. Це підтверджує *актуальність* теми роботи.

В роботі вирішувалась *наукова проблема*, яка полягає у встановленні закономірностей та механізму формування гранулометричного складу продуктів тонкого подрібнення для досягнення необхідної дисперсності продукту при мінімальному енергоспоживанні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами. Робота виконана у відділі термогазодинаміки енергетичних установок Інституту технічної механіки Національної академії наук України й Державної космічної агенції України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) і пов'язана з наступними держбюджетними темами Інституту, в яких автор була відповідальним виконавцем розділів:

«Дослідження газодинаміки технічних систем щодо забезпечення їхнього надійного функціонування» № ДР 0107U001320;

«Дослідження термогазодинаміки процесів газоструминного транспортування та обробки сипучих матеріалів» № ДР 0109U000341;

«Дослідження термогазодинамічних процесів високоентальпійних керованих газових потоків щодо проблем створення нових і вдосконалених ракетно-космічних двигунів і енергетичних установок» № ДР 0111U000265.

Мета роботи – створення цілісного уявлення процесу тонкого подрібнення корисних копалин для розробки технології й обґрунтування технологічних і режимних параметрів процесу, що забезпечують зниження енергоємності одержання тонкодисперсних порошків.

Для досягнення мети було вирішено наступні задачі:

1) встановлення енергетичних особливостей тонкого подрібнення та розкриття механізму формування гранулометричного складу матеріалу при подрібненні;

2) моделювання процесу тонкого подрібнення для знаходження оптимальних умов одержання продукту необхідної крупності й дисперсності;

3) розвиток теоретичних основ процесу подрібнення корисних копалин з використанням акустоемісійного моніторингу і встановлення відповідності амплітудно-частотних характеристик акустичних сигналів і технологічних параметрів подрібнення;

4) розробка критеріїв ефективності й системи візуалізації та ідентифікації режимів тонкого подрібнення з використанням інформаційних технологій;

5) розробка рекомендацій щодо методів зниження енергоспоживання струминних млинів на основі використання результатів моніторингу емісійних ефектів руйнування.

Об'єкт даного дослідження – процеси тонкого подрібнення з позицій аналізу зв'язку його енергоємності з формуванням гранулометричного складу продуктів.

Предмет дослідження – зв'язки технологічних й емісійних параметрів процесу подрібнення.

Методи дослідження: теоретичний аналіз – для дослідження енергетичних і кінетичних особливостей тонкого подрібнення; імітаційне, балансове, динамічне моделювання – для вивчення закономірностей зменшення крупності матеріалу в замкнутому циклі; чисельні дослідження – для аналізу акустичних сигналів і візуалізації результатів акустичного моніторингу процесу; експериментальні дослідження - для перевірки теоретичних положень і створення бази даних результатів тонкого подрібнення матеріалів.

Наукові положення, що захищаються в дисертації:

1) інтенсивність утворення нової поверхні при тонкому подрібненні твердих корисних копалин прямо пропорційна витраченій енергії й знижується при досягненні крупності продукту подрібнення критичної величини (15 - 25 мкм залежно від матеріалу), обумовленої підвищенням міцності часток;

2) кінетика подрібнення фракції крупності твердих корисних копалин у суміші не залежить від наявності інших фракцій крупності, що подрібнюються сумісно;

3) продуктивність млина за готовим продуктом в замкнутому циклі подрібнення зростає пропорційно вмісту в млині класу, крупніше контрольного;

4) величина знову утвореної питомої поверхні прямо пропорційна кількості малоамплітудних (до десятка мілівольт) сигналів і обернено пропорційна максимальним (порядку сотень мілівольт) значенням амплітуд акустичних сигналів, що виникають при руйнуванні рудних часток;

5) процес тонкого подрібнення корисних копалин визначається комплексом технолого-акустичних критеріїв, які пов'язують продуктивність, дисперсність, енергоємність із амплітудно-частотними характеристиками сигналів, що виникають при руйнуванні рудних часток і дозволяють визначити раціональні режимні параметри для досягнення максимального технологічного ефекту.

Наукова новизна отриманих результатів:

1) вперше сформульовані і узагальнені для різних видів подрібнення особливості формування гранулометричного складу тонкодисперсного продукту та встановлено зміну зв'язку дисперсності з енерговитратами на процес, що стало базою контролю енергоємності процесу; на основі встановленої незалежності

кінетики подрібнення фракцій крупності в суміші та отриманих оцінок кінетики процесу зміни гранулометричного складу продукту розроблено метод прогнозування вузьких фракцій продукту під час подрібнення;

2) уперше розроблено імітаційну, динамічну і стохастичну моделі тонкого подрібнення та коміркову модель подрібнення матеріалу на основі результатів акустичного моніторингу процесу, що дозволяють ідентифікувати режими процесу й вибирати оптимальні;

3) вперше розроблено новий метод оптимізації технології струминного подрібнення, що відрізняється використанням явища акустичної емісії при руйнуванні твердих тіл для моніторингу процесу подрібнення; вперше отримано теоретичні й експериментальні залежності, які характеризують зв'язок питомої поверхні матеріалу, що подрібнюється, гранулометричного складу матеріалу, продуктивності млинів з акустичними параметрами процесу подрібнення, що дозволило розробити принципи оптимізації струминного подрібнення;

4) вперше розроблено методи візуалізації й ідентифікації процесу подрібнення на основі використання інформаційних технологій для аналізу акусто-емісійних сигналів зони подрібнення та класифікації, що дозволило контролювати режими роботи млина й вибирати оптимальне його завантаження;

5) подальший розвиток одержало дослідження на основі балансового моделювання взаємозв'язку питомої продуктивності млина з режимом класифікації щодо крупності розвантаження млина, що дозволило виділити критерії підвищення ефективності подрібнення та вперше встановити характерний параметр млина для руди, що подрібнюється, який використовується для розрахунку продуктивності замкнутих циклів.

Практичне значення роботи:

1) розроблено методики акустичного моніторингу й створено бази даних акустичних параметрів, що дозволяють визначити оптимальні технологічні параметри струминного подрібнення для досягнення заданої дисперсності продукту;

2) розроблено методики використання наступних інформаційних технологій при ідентифікації процесу струминного подрібнення: нейромережний аналіз режимів подрібнення, Вейвлет та енергетичний аналіз акустичних сигналів зони подрібнення, аналіз поверхні функції щільності розподілу імовірності значень амплітуд сигналів зони подрібнення та класифікації, моделювання на основі ланцюгів Маркова. Це дозволило на базі обмеженої кількості вихідних даних виконати вибір оптимальних параметрів процесу струминного подрібнення для одержання заданої дисперсності продуктів різних матеріалів;

3) розроблено безконтактні способи контролю процесу й якості продукту тонкого подрібнення, що захищені патентами України на винахід і дозволяють істотно підвищити продуктивність млина, скоротити час досліджень, підвищити точність оцінок;

4) розроблено методику проведення акустичного моніторингу роботи струминного млина, порядок проведення акустичних вимірювань, результати використання яких було викладено та затверджено в акті промислового опробування акустичного моніторингу струминної установки в умовах ВГМК;

5) розроблено систему оптимізації роботи промислового млина, одержано кількісні показники акустичної та технологічної енергоємності подрібнення та диспергування циркону в різних режимах роботи промислового млина ВГМК, що підвищило продуктивність млина до 50% та обумовило річний економічний ефект 185-507 тис. грн. в залежності від контрольної крупності цирконового концентрату (акт впровадження).

б) створено базу даних результатів акустичного моніторингу, методики аналізу акустичних сигналів, що застосовуються в навчальному процесі студентів спеціальностей «Збагачення корисних коралин», «Інформаційні управляючі системи та технології» ДВНЗ «Національний гірничий університет».

Особистий внесок автора полягає в постановці наукової проблеми, мети та задач дослідження, розробці й створенні математичних моделей процесу подрібнення, аналізу замкнених циклів тонкого подрібнення, у розробці схеми й методики акустичного моніторингу процесу подрібнення, у плануванні, організації, проведенні експериментальних досліджень і обробці їхніх результатів. Обґрунтування та впровадження в промисловість теоретичних розробок та акустичного моніторингу процесу тонкого подрібнення проведено з участю автора та його винаходів.

У статтях, опублікованих автором, відбитий його особистий внесок у розробку наукових результатів. Експериментальні дослідження, що ввійшли в дисертаційну роботу, виконано безпосередньо здобувачем за участю співробітників відділу термогазодинаміки енергетичних установок ІТМ НАНУ і ДКАУ, кафедри збагачення корисних копалин ДВНЗ «Національний гірничий університет». Результати опубліковані в співавторстві з ними.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати роботи доповідались на: VI - IX конгресах збагачувачів країн СНД 2007-2013рр., (м. Москва), Форумах гірників 2006-2014рр. (м. Дніпропетровськ), Міжнародних науково-практичних конференціях «Вибрації в техніці та технологіях», 2007р. (м. Львів), 2009р. (м. Вінниця), 2012р. (м. Полтава), Міжнародних XIV- XX науково-технічних конференціях «Теорія й практика процесів здрібнювання, поділу, змішання й ущільнення матеріалів» в 2006-2014 рр. (м. Одеса), Науково-технічної конференції «Застосування дисперсних і ультра-дисперсних порошкових систем у промислових технологіях», 2008р. (Санкт-Петербург), Науково-технічних конференціях «Інформаційні технології в металургії й машинобудуванні (ІТТМ) 2010-2015 рр. (м. Дніпропетровськ), Міжнародних науково-практичних конференціях «Сталлий розвиток гірничо-металургійної промисловості: досягнення, проблеми та перспективи розвитку - 2008, 2010, 2011рр.» (м. Кривий Ріг), Міжнародної проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, енергетики, економіки, моделювання та управління (ПНМК-2011), 2011р. (м. Бучач), XIV Міжнародної наукової конференції «Нові технології й досягнення в металургії й інженерії матеріалів і процесів», 2013р. (м. Ченстохов, Польща), 22-nd Mine Planning & Equipment Selection (MPES) Conference, 2013 (м. Дрезден, Німеччина).

Матеріали дисертації розглядалися на Вченій Раді ІТМ НАН України і ДКА України 2011, 2014 і 2015р. та на засіданні кафедри збагачення корисних копалин ДВНЗ «Національний гірничий університет» (2014-2015р.).

Публікації. Всього за результатами дисертаційних досліджень опубліковано 104 роботи та одержано 8 патентів на винахід. Основні результати досліджень опубліковані в 49-ти наукових працях, у тому числі у 37 статтях у науково-технічних журналах, які входять у відповідний перелік ДАК, із них 12 – у іноземних виданнях та таких, що входять у наукометричні бази, трьох патентах України, 9 доповідях на наукових міжнародних конференціях.

Структура й об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, 6 розділів, висновків, списку використаної літератури з 130 найменувань на 13 сторінках; містить 274 сторінок тексту, у тому числі 111 рисунків, 26 таблиць, а також 8 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми і наукової проблеми, сформульовано мету й задачі досліджень, визначено наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, приведено відомості про їхню реалізацію, а також про апробацію роботи й публікації з теми дисертації.

У першому розділі виконано аналіз основних показників і фізичні основи руйнування в процесі дезінтеграції мінеральної сировини в замкнутих циклах, особливостей тонкого подрібнення й застосування методу акустичної емісії для вивчення ефектів подрібнення при руйнуванні порід.

У наукових працях, що стосуються процесу подрібнення, розглядаються різні його аспекти: взаємозв'язок механіки руйнування мінеральної сировини й механіки установки для подрібнення, витрат енергії й дисперсності продукту, гранулометрії порошків і механоактивації матеріалів. Проблемам подрібнення присвячені роботи С. Є. Андрєєва, Л. Ф. Біленко, Л. А. Вайсберга, Л. Ж. Горобець, Г.В. Губіна, В. І. Кармазіна, А. Дж. Линча, А. М. Москальова, В.П.Надутого, П. І. Пілова, В. І. Ревнивцева, М.І. Сокура, В. В. Товарова, Г. С. Ходакова та інших.

Незважаючи на роботи з основних положень фізики руйнування, експериментальні і теоретичні роботи з різних аспектів подрібнення, процес тонкого подрібнення є недостатньо вивченим. Основне завдання - реалізація пошуку оптимального режиму подрібнення, його підтримки в різних ступенях завантаження млина матеріалом при дотриманні необхідної дисперсності кінцевого продукту, встановлення зв'язку між витраченою енергією й досягнутою при цьому дисперсністю матеріалу. Аналіз робіт показав, що це завдання вирішується експериментально, зіставленням результатів випробувань досліджуваного процесу результатам подрібнення порції матеріалу в стандартних промислових умовах.

Існують наступні підходи до моделювання подрібнення: імітаційне (стаціонарне) і динамічне моделювання, що використовують для моделювання схем рудопідготовки, моделювання із застосуванням ланцюгів Маркова для технології обробки дисперсних матеріалів. Однак останній підхід має істотний недолік: на його основі неможливо контролювати поточні параметри процесу, визначати

матрицю подрібнення й під час подрібнення оптимізувати його процес. Для розвитку теорії тонкого подрібнення необхідний новий підхід.

Дослідження процесу мікроруйнування матеріалу різними видами навантаження показали, що одним із чутливих ефектів, що характеризують мікроушкодження, є ефект акустичної емісії. Він пов'язаний з випромінюванням пружних хвиль твердим тілом внаслідок внутрішньої динамічної перебудови його структури. Закономірності акустичної емісії спостерігаються при різних видах ушкоджень. Метод акустичної емісії, як засіб акустико-емісійного моніторингу є основою дослідження руйнування матеріалів при струминному подрібненні. Для розробки методології акустичного моніторингу тонкого подрібнення необхідно визначити зв'язок параметрів акустичних сигналів (АС) і режимів, технологічних показників процесу для вибору оптимальних режимів подрібнення.

На основі виконаного аналізу було сформульовано мету й задачі дослідження.

У другому розділі викладено основні результати, що стосуються вирішення першої задачі роботи. Дослідження направлені на розвиток теорії тонкого подрібнення руд з позицій рішення технологічного завдання – забезпечення розкриття вкраплених мінералів при мінімальних витратах енергії. Аналіз енергетичних особливостей тонкого й надтонкого подрібнення дозволив встановити існування критичного рівня енергоємності процесу, перехід через який змінює залежність знову утвореної питомої поверхні від витрат енергії на цей процес.

Експериментальні дослідження закономірностей подрібнення в кульових млинах дозволили виділити головну характеристику, що зв'язує знову утворену питому поверхню при подрібненні з енерговитратами на цей процес. На графіку $S_{\text{пит}}(E_{\text{пит}})$ (рис. 1) виділяємо три ділянки, що відрізняються кутом нахилу.

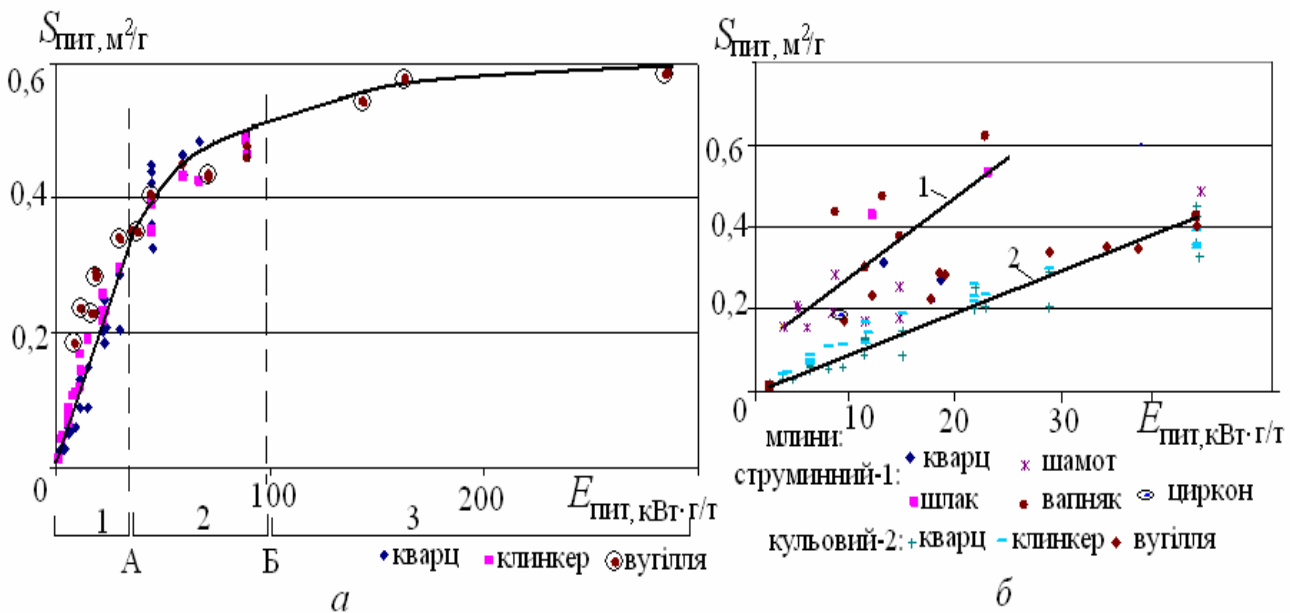


Рис. 1 – Залежності питомої поверхні продуктів від питомих енерговитрат.

Лінійна залежність із максимальним кутом нахилу (ділянка 1 на рис. 1а) відповідає помелу великих часток. Зі зменшенням розміру часток чутливість

характеристики й, відповідно, кут нахилу залежності знижується (ділянка 2 на рис. 1а). Третя ділянка відповідає умовам, коли розміри часток наближаються до мікронних. Для руйнування таких часток необхідно витратити підвищену енергію, тому характеристика $S_{num}(E_{num})$ стає ще менш чутливою, і кут нахилу значно зменшується (ділянка 3 рис. 1а).

У цьому зв'язку границя Б (критичний рівень) характеризує граничні можливості механічного розкриття коштовних компонентів і збагачення. При оптимізації тонкого подрібнення необхідно забезпечити контроль переходу енергоспоживання за встановлений критичний рівень тому, що це порушує умову оптимальності подрібнення.

Струминне подрібнення забезпечує одержання більш тонкого продукту S_{num} до $8000\text{см}^2/\text{г}$). Рівняння залежностей питомої поверхні від енергоємності для тонкого подрібнення (див. мал. 1б) у струминному (пряма 1) і кульовому (пряма 2) млинах у діапазоні $E_{num} \leq 50$ кВт-г/т мають вигляд:

$$S_{num}^1 = 182,4E_{num} + 1057,5, \quad (1)$$

$$S_{num}^2 = 95,5E_{num} + 28,2. \quad (2)$$

Коефіцієнти рівнянь k_1 і k_2 характеризують підвищену динамічність струминного подрібнення ($k_1 = 182,4$) порівняно кульовим ($k_2 = 95,5$) способом. У результаті досягаються значно менші розміри часток.

Аналіз продуктів тонкого подрібнення показав закономірне підвищення енергоємності млина при досягненні певної величини розміру часток продуктів. Для струминного подрібнення – 10-15 мкм, тоді як для кульового подрібнення ця величина склала 40-60 мкм. Міцність часток Ω збільшується зі зменшенням їхнього розміру d , особливо в області розмірів часток менш 2,5 мм. Це підтверджується експериментально встановленою закономірністю на прикладі тонкого подрібнення клінкера й вапняку (експериментальні дані Іванова А. М.) у вигляді:

$$\Omega(d) = 88,2d^{-0,872} \quad (\text{коефіцієнт кореляції } R = 97,5). \quad (3)$$

Отже, для виключення переходу величини енергоємності через критичну величину необхідно здійснювати керування процесом тонкого подрібнення з використанням математичного моделювання й інформаційних технологій.

Основою моделювання служили результати дослідження кінетики подрібнення фракцій полікомпонентної мінеральної системи, що включають мінерали з різною міцністю й схильністю до подрібнення. Сипучий матеріал розглядаємо як суміш окремих фракцій часток різного розміру, розділених на класи відповідно до гранулометричного складу готового продукту. Ґрунтуючись на незалежності результатів подрібнення різноміцних компонентів у суміші, вважаємо, що вузькі фракції, перебуваючи в складі суміші, подрібнюються за своїми законами.

Побудовано кінетичні криві експериментального подрібнення вихідних матеріалів і їхніх окремих фракцій. Для зіставлення кінетики роздільного подрібнення фракцій з їхнім подрібненням у суміші (вихідний продукт) розраховувались модельна суміш фракцій за результатами подрібнення вузьких фракцій згідно формули:

$$\gamma_{\text{суміш фр}}^i = \gamma_1 R_1^i + \gamma_2 R_2^i + \gamma_3 R_3^i, \quad (4)$$

де R_j^i – залишок j фракції на i ситі, γ_j – вихід j фракції в гранулометричному складі первинного матеріалу.

На рис. 2 показана кінетика струминного подрібнення вихідного матеріалу (шамоту -2,5мм) і змодельованої суміші. Результати порівняння кінетики подрібнення окремих вузьких фракцій і вихідної суміші підтверджують незалежність кінетики подрібнення вузьких фракцій в суміші. На основі доведеної гіпотези про незалежне подрібнення класів крупності в суміші розроблено комплексний підхід до аналізу кінетики процесу подрібнення, що враховує як кінетику знову утвореної питомої поверхні, так і закономірності скорочення крупності.

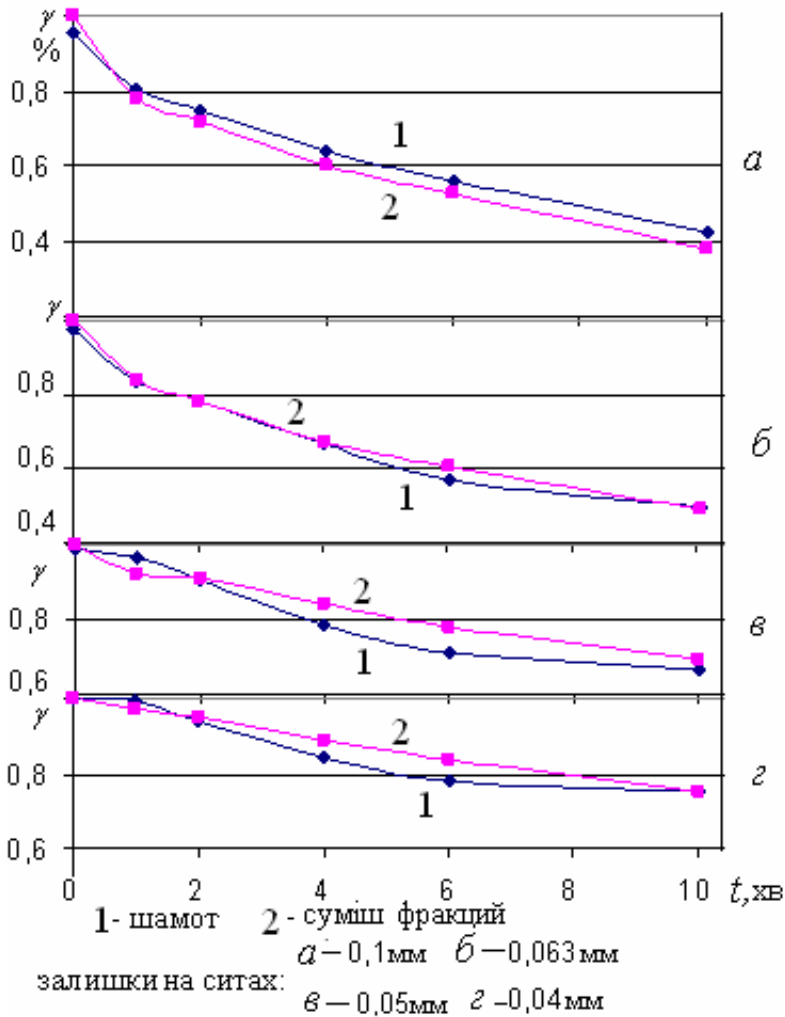


Рис. 2 – Кінетика подрібнення первинної суміші (1) та змодельованої суміші фракцій (2).

Процес тонкого подрібнення в млинах різного типу пропонується оцінити математичним сподіванням (Mx) і стандартним відхиленням σ гранулометричного складу матеріалу згідно формул:

$$\begin{cases} Mx(t) = a_1 t^2 - a_2 t + a_3, \\ \sigma(t) = b_1 t^2 - b_2 t + b_3, \end{cases} \quad (5)$$

$$Mx(t) = \sum_{i=1}^N (\gamma_i \bar{d}_i), \quad (6)$$

де t – час подрібнення, γ_i, \bar{d}_i – вихід класу крупності матеріалу, % та середній діаметр часток цього класу, відповідно, N – кількість класів.

Встановлено, що коефіцієнти a_i, b_i залежать від властивостей матеріалу й типу млина (струминний, кульовий, стрижневий). Аналіз коефіцієнтів рівняння

залежності $\sigma(t)$ за знаком дозволяє судити про ступінь завершеності процесу подрібнення до заданої питомої поверхні або крупності.

Рівняння для питомої знову утвореної поверхні з урахуванням виразу для математичного сподівання розподілу гранулометричного складу матеріалу (5), має вигляд:

$$S = k_s M \frac{1}{x}(t), \quad (7)$$

де k_s - коефіцієнт поверхні часток, що враховує розбіжність площі бічної поверхні реальних подрібнених часток і відповідних сферичних часток, рівновеликих їм щодо об'єму. Показано, що при визначенні величини коефіцієнту k_s врахування внеску класів дрібних часток (менш 40 мкм) дозволяє зменшити погрішності розрахунків на порядок.

Експериментально встановлено зв'язок коефіцієнту поверхні k_s із щільністю й питомою поверхнею матеріалу:

$$k_s = 0,88\rho^2 - 8,7\rho + 26,66, \quad k_s = 0,002S_{y\partial} - 1,13. \quad (8)$$

Використання рівнянь (5) - (8) дозволяє прогнозувати кінетику подрібнення на основі контролю дисперсності за коефіцієнтами рівняння стандартного відхилення гранулометричного складу й, таким чином, виключити перездрібнювання матеріалу.

Враховуючи, що приріст знову утвореної поверхні мінеральних зерен при подрібненні, відповідно до гіпотези Риттингера, пропорційний витраченій енергії на її утворення, то зниження енергоємності подрібнення можливо при зниженні питомої поверхні продукту. Однак, збільшеній поверхні відповідає нова дисперсність, що описується відповідною функцією розподілу. Показано, що оптимізувати процес подрібнення треба, взявши за основу цільову функцію $s \Rightarrow s_{min}$ при досягненні вмісту розрахункового (контрольного) класу крупності, що задається технологією наступного використання подрібненого продукту, тобто $\beta_{-a} = \int_0^a \varphi(x) dx$. Тоді максимальна продуктивність млина за знов утворе-

ним контрольним класом крупності досягається при мінімально можливій питомій поверхні подрібненого продукту із заданим вмістом контрольного класу крупності.

Рівняння (5) - (6) використано для обґрунтування технологічних схем подрібнення на основі обчислення швидкості подрібнення матеріалів з використанням швидкості подрібнення фракцій. Аналізувались результати струминного подрібнення шлаків, поліметалевої руди в кульовому млині й бідних мідно - нікелевих руд у стрижневому й кульовому млині.

На прикладах подрібнення в різних млинах встановлено, що швидкість подрібнення великих фракцій є спадною функцією (див. рис. 3а), для середніх і дрібних фракцій криві швидкості мають знакозмінний характер, при цьому швидкість убування дрібних класів крупності при струминному подрібненні досягає 10 %/хв, тоді як при стрижневому подрібненні – 5 % /хв, а кульовому –

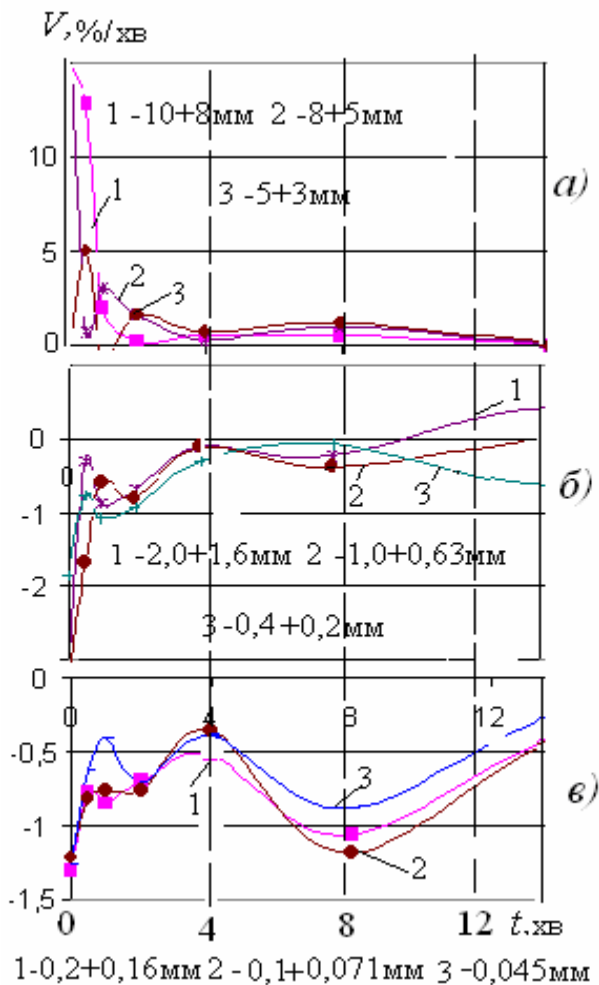


Рис. 3 – Швидкості подрібнення великих (а), середніх (б) і дрібних в) фракцій бідної мідно-нікелевої руди в кульовому млині

балансова, імітаційна, динамічна й стохастична.

На основі розрахунку балансу контрольного класу складено моделі замкнених циклів подрібнення з контрольною класифікацією, а також зі з'єднанням попередньої й контрольної класифікацій подрібненого продукту. Керуваними факторами вважаємо час перебування у млині матеріалу, що подрібнюється, й сепараційну характеристику класифікатора, яку представляли у вигляді показників імовірності витягу в готовий продукт класу E' менш і E'' більше розрахункової крупності. Як показник, що характеризує крупність продукту, використано величину залишку R на контрольному ситі.

Для варіанта моделі замкнутого циклу подрібнення з контрольною класифікацією подрібненого продукту баланс залишку контрольного класу в операції класифікації щодо крупності описується рівнянням:

$$(1+c)R_m = R + cR_s, \quad (10)$$

звідки
$$R = \frac{(1+c)R_mE''}{(1+c)R_mE'' + (1+c)(1-R_m)E'} = \frac{R_mE''}{R_mE'' + (1-R_m)E'} \quad (11)$$

до 0,5 %/хв.

Аналіз швидкості убування вузьких класів бідної мідно-нікелевої руди в стрижневому й кульовому млинах показав переваги стрижневого млина для одержання продукту дисперсністю менш 2,0 мм. На рис. 3 показано швидкості подрібнення вузьких фракцій, що обчислюються за формулою:

$$v_{ni} = \frac{\Delta\gamma_i}{\Delta t} = (\gamma_i - \gamma_{i+1}) / \Delta t, \quad (9)$$

У результаті доцільно використати комбінований метод: спочатку стрижневий для одержання 90 % продукту крупністю менш 2,0 мм, потім для одержання продукту менш 0,071 мм підключати кульовий млин, а струминний використовувати на третьому етапі.

Результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень дозволили вирішити першу задачу і сформулю-

вати перші два наукових положення.

У третьому розділі наведено результати вирішення другої задачі досліджень. Викладено чотири варіанти моделей процесу тонкого подрібнення:

Залишок контрольного класу в розвантаженні млина R_m визначається за кінетикою подрібнення. На здрібнювання надходить комбіноване завантаження із залишком контрольного класу R_n $R_m = R_n e^{-kt}$. Залишок контрольного класу в завантаженні млина знаходимо з рівняння:

$$R_n = \frac{R_0 + R \frac{1 - E''}{E''}}{1 + c} \quad (12)$$

Після перетворень, одержуємо:

$$e^{kt} = E'' \left(\frac{R_0}{R} - 1 \right) + 1 = A. \quad (13)$$

Вираз для визначення питомої об'ємної продуктивності млина за вихідним продуктом має вигляд:

$$q_V = \frac{k}{\ln A(1 + c)}. \quad (14)$$

Питома продуктивність за знов утвореним класом визначається формулою:

$$q_a^V = q_V (R_0 - R) = \frac{k(R_0 - R)}{\ln A(1 + c)}. \quad (15)$$

Запропонована модель замкнутого циклу подрібнення зі суміщенням попередньої й контрольної класифікації застосовується для другої й наступних стадій тонкого подрібнення. Слід зазначити, що для обох моделей формули для розрахунку продуктивності млина за знов утвореним класом q_a^V ідентичні. Однак у другому варіанті вираз для розрахунку параметра A (див. рівняння 13) має вигляд:

$$A = e^{kt} = \frac{1 - E''}{1 - \frac{R_0}{R} E''}. \quad (16)$$

У результаті моделювання визначена залежність для питомої продуктивності млина за знов утвореним контрольним класом при необхідній дисперсності подрібненого продукту. Величину q_a^V рекомендується приймати за константу млина при подрібненні даної руди й використовувати в рівнянні кінетики подрібнення та для розрахунку продуктивності замкнутих циклів подрібнення.

Таким чином, корисність застосування обох моделей складається в реальному рості продуктивності млина за рахунок підвищення ефективності класифікації щодо крупності розвантаження млина при збільшенні ступеня витягу E' й зниженні ступеня витягу E'' . За допомогою розроблених моделей встановлено ступінь впливу гранулометричного складу матеріалу, що подрібнюється, на продуктивність млина. При незмінній потужності електроприводу з ростом продуктивності млина знижуються питомі енерговитрати за формулою:

$$E_{num} = \frac{N(R_0 - R)}{q_a^V \delta V}, \text{кВт} \cdot \text{г/т}. \quad (17)$$

Адекватність моделей замкнутих циклів перевірено на результатах роботи рудорозмельних млинів залізорудних збагачувальних фабрик Криворізького басейну. Коефіцієнт надійності апроксимації склав $R = 0,993$.

Розроблено імітаційну модель процесу подрібнення в замкнутих циклах, що базується на дискретно-подійному підході моделювання стохастичних динамічних процесів. Програмний комплекс складається із двох підсистем: 1) моделі кінетики руху матеріалу в замкнутій системі при безперервному подрібненні; 2) моделі кінетики переходів матеріалу між фракціями усередині млина.

У моделі передбачається, що потік є суміш поліфракційного сипучого матеріалу B , що дискретними порціями ΔV надходить у накопичувач H через рівні проміжки часу Δt . Протягом Δt порція матеріалу, що перебуває в накопичувачі V_m , надходить у млин M , звідки після подрібнення – у класифікатор K . У класифікаторі відбувається відділення якогось об'єму готового продукту V_g , а об'єм циркулюючого навантаження $V_{ц} = V_m - V_g$ транспортується в накопичувач (див. рис. 4).

Припускаємо, що в початковий момент часу в млині перебуває об'єм матеріалу $V_m = km V_{мл}$, де $V_{мл}$ - об'єм млина, km - коефіцієнт завантаження млина, при якому процес подрібнення має найвищу ефективність. Фракційний склад піддається зміні в трьох вузлах технологічної схеми: у змішувачі, у млині й у класифікаторі й визначається коефіцієнтами $k[x]i$, індекс ділянки технологічної схеми, де визначається цей коефіцієнт визначаємо як $[x]$, а i - номер фракції гранулометричного складу суміші. При цьому $\sum k[x]i = 1$.

У початковий момент часу передбачається, що гранулометричний склад матеріалу, що перебуває в млині, відповідає складу потоку матеріалу, що поступає в млин, й визначається матрицею коефіцієнтів kn_i . як:

$$kz_i = (Qn_i \cdot kn_i + Qk_i \cdot kk_i) / \sum (Qn_i + Qk_i), \quad (18)$$

де Qn_i , Qk_i і kn_i , kk_i – витрати i -ї фракції з живильника й циркуляційного навантаження, і відповідні коефіцієнти гранулометричного складу для i фракції.

Гранулометричний склад матеріалу, що виходить із млина, у даній моделі визначається на основі кінетики подрібнення, тобто маса матеріалу при подрібненні за час Δt визначається селективною функцією подрібнення S_{ij} , що показує частку i фракції, що руйнується за одиницю часу. Селективна функція задається трикутною матрицею коефіцієнтів подрібнення a_{ij} , що визначають частку об'єму маси матеріалу, що переходить у результаті руйнування з i фракції в j фракцію (обрано вісім фракцій) і визначається співвідношеннями:

$$kd_n = kz_1 \sum_{j=1}^n a_{n,j}, n = 1 \dots 8. \quad (19)$$

Встановлено вплив типу завантаження млина на продуктивність млина. На графіку $G(t)$ рис. 4а) цифрою 1 позначена продуктивність при постійному завантаженні, 2 - при дискретному завантаженні з вибором періоду завантаження, що залежить від здібності матеріалу до подрібнення. Для моделювання використано матрицю подрібнення кварцового піску в струминному млині. При дискретному завантаженні продуктивність збільшилась на 1,4%.

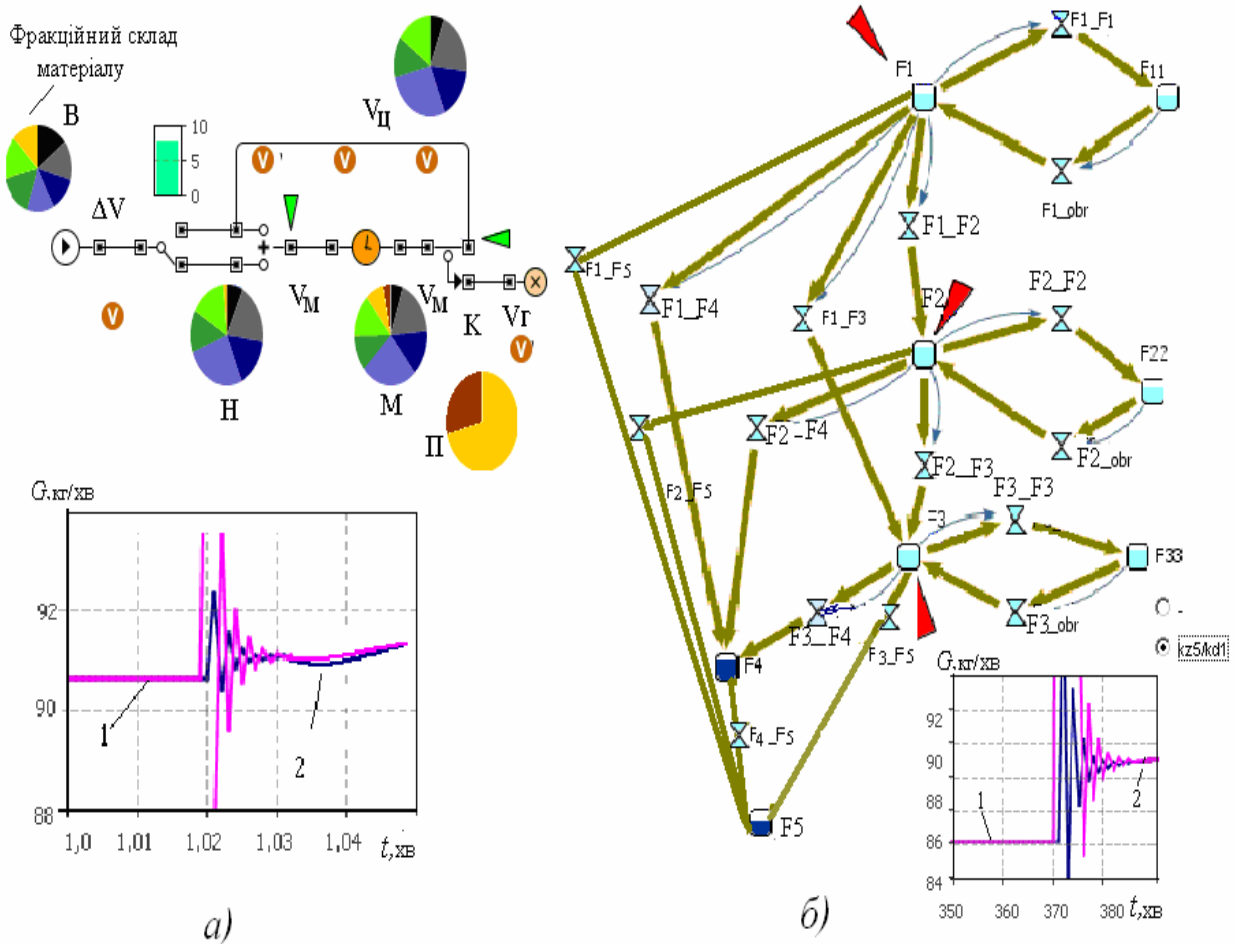


Рис. 4 – Структура імітаційної моделі замкнутого циклу подрібнення (а) і динамічної моделі кінетики гранулометричного складу в млині (б)

На цій же базі створено модель кінетики переходів матеріалу між фракціями усередині млина. Для визначеності використано п'ятифракційну модель матеріалу при подрібненні. Модель побудована згідно наступного принципу. Існує п'ять накопичувачів F_i , $i = 1 \div 5$, що імітують об'єм п'яти фракцій усередині млина (див. рис. 4б). У початковий момент часу в накопичувачах $F1$, $F2$, $F3$ перебуває певний об'єм вихідного матеріалу трьох різних фракцій, у накопичувачах $F4$, $F5$ матеріал відсутній. Значення накопичувачів у кожний момент часу обчислюється відповідно до диференціальних рівнянь:

$$d(F_i)/dt = - \sum_{j=1}^5 (k_{ij} F_i - F_j), \quad (20)$$

причому $F_i - F_i = F_i$ і $k_{5,j} = -1$. Рішення цих диференціальних рівнянь здійснюється чисельним методом Ейлера. Значення коефіцієнтів $k_{i,j}$, що визначають зміни складу, у загальному випадку залежать від багатьох параметрів. Допускаємо, що вони визначаються часткою від відповідних накопичувачів.

Після встановлення стабільної роботи млина продуктивність залежить за інших рівних умов від співвідношення окремих фракцій у загальному об'ємі матеріалу до й після подрібнення. Це дозволило розробити оптимізаційні критерії керування продуктивністю млина на основі контролю гранулометричного

складу. Встановлено показник перездрібнювання K , що обчислюється як відношення об'єму самої дрібної фракції на вході в млин до об'єму самої великої фракції на виході із млина $K = kz_s/kd_l$. Таким чином, об'єм матеріалу, що подається у млин, визначається формулою $V_n = K \cdot kmV_m - V_u$. На рис. 4б) видно, що контроль складу фракцій дозволив підвищити продуктивність на 5 - 7% (пряма 2 на рис. 4б).

На основі стохастичного підходу створено математичну модель тонкого подрібнення в помольній камері й розроблено алгоритм оцінки параметрів отриманого рішення. Створено математичну модель із використанням рівняння Колмогорова–Фоккера–Планка щодо концентрації часток $c(x, y, z, t)$, яка є функцією, що убуває вздовж математичного сподівання траєкторії блукання, спрямованої від початкового положення частки в об'ємі камери до точки перетинання з вертикальною площиною перетину камери, в якій відбувається винос частки, або до точки зіткнення даної частки з іншою. Блукання частки розглядаються у виділеному шарі з радіусом, рівним абсолютному відхиленню в рухливій системі координат від траєкторії детермінованого руху частки. Цей шар визначений для блукання всього класу часток даної характеристики крупності x . Рівняння масопереносу для одновимірної задачі має вигляд:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + ag(\rho\tau - \rho_m)(1 - 2c) \frac{\partial c}{\partial x}. \quad (21)$$

Рішення рівняння (21) знаходимо у вигляді: $C(t, l) = (C_1 e^{k_1 l} + C_2 e^{k_2 l}) e^{-\lambda t}$. Невизначені коефіцієнти знайдено з граничних і початкових умов. Згідно частці продукту $m_x(t)$, що залишається в процесі подрібнення після закінчення часу t , знаходимо ступінь подрібнення (вихід продукту) $\varepsilon(x)$ часток з характеристикою x :

$$s(x) = \frac{\gamma - m_x}{\gamma} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\lambda_m} \cdot \int_0^{\lambda_m} \left(\int_0^\infty H(l) \cdot G(t) dl \right) d\lambda = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_m t}}{\lambda_m t}. \quad (22)$$

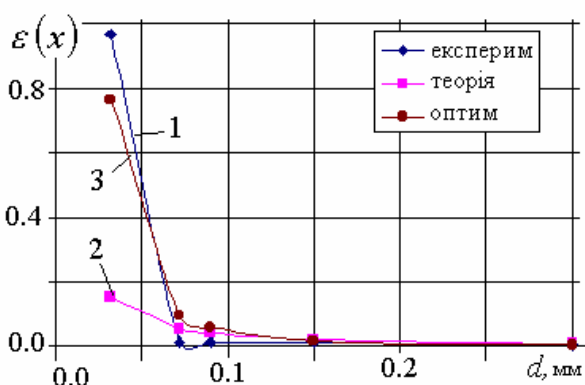


Рис. 5 – Гранулометричні склади продукту подрібнення

У четвертому розділі наведено результати вирішення третьої задачі і наведено результати дослідження процесу тонкого подрібнення на основі використання АС зони помелу, що записуються при безперервному моніторингу. Про-

На рис. 5 наведено порівняння результатів розрахунку гранулометричного складу подрібненого продукту за математичною моделлю з реалізацією програми оптимізації й даних експериментального подрібнення кварцового піску на лабораторній установці.

Таким чином, було вирішено другу задачу й сформульовано третє наукове положення.

цес подрібнення розглядається як динамічна система, для якої поняття стану однозначно визначено, як сукупності АС у цей момент часу й задані закономірності, які описують зміну (еволюцію) початкового стану із часом. Процес подрібнення моделюється на основі ланцюгів Маркова з застосуванням коміркової моделі для результатів акустичного моніторингу.

Новизна моделі полягає в тому, що на відміну від існуючих для створення моделі на прикладі подрібнення в струминному млині весь діапазон АС розбивається на піддіапазони сигналів із середніми розмірами амплітуди $A_i, i = 1, 2, \dots, m$, де $i = 1$ відповідає A_{max} . Таким чином, всі сигнали розбиваються на m комірок згідно розмірів їхніх амплітуд. Число сигналів із відповідними амплітудами визначає стан елементарної комірки. Кількість АС може бути представлено вектором стовпцем $N = (n_i), i = 1, \dots, m$, де n_i - число АС i комірки, тобто число сигналів, що мають амплітуду A_i . При моделюванні кінетики струминного подрібнення процес розглядається як послідовність малих проміжків часу Δt - часу переходу, тоді поточний момент часу процесу й запис акустичного моніторингу будуть визначатися як $t_k = k\Delta t$, де ціле число $k = 1, 2, \dots$ номер переходу. За k -й перехід вектор стану N^k перейде в N^{k+1} . У результаті подрібнення частки стають менше й, відповідно, амплітуди вимірюваних АС – менше. Таким чином, $(k+1)$ - стан перших двох комірок (з найбільшими амплітудами) можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} n_1^{k+1} &= g_{11}n_1^k + 0 \cdot n_2^k + \dots + 0 \\ n_2^{k+1} &= g_{21}n_1^k + g_{22}n_2^k + \dots + 0 \end{aligned}$$

де g_{ii} й g_{ij} трактуються як імовірності того, що сигнал i комірки залишається в

i комірці або переходить в іншу j комірку, відповідно, причому $\sum_{k=1}^l \sum_{i=1}^m g_{ik} = 1$. Ці

коефіцієнти утворюють трикутну матрицю ймовірностей переходу при подрібненні або матрицю подрібнення G , визначення якої є основою математичної моделі процесу подрібнення. Селективна функція подрібнення $S(A)$ описує швидкість подрібнення, що у нашій випадку описує швидкість зменшення в одиницю часу кількості сигналів з величиною амплітуди, що попадає в комірку (піддіапазон) A_i , тоді $\Delta n_i^- = n_i S_i \Delta t$.

Сигнали зі зниженим рівнем амплітуди переходять у сусідні комірки, де перебувають сигнали з меншими амплітудами. Цей процес описується розподільною функцією b_{ij} , що показує ймовірність переходу сигналів з j -ої комірки в i -у. Процес подрібнення призводить до збільшення числа записаних у дискретний момент часу сигналів і розташованих в комірці з меншими амплітудами на величину $\Delta n_i^+ = \sum_j b_{ij} n_j S_j \Delta t$.

Таким чином, при періодичному завантаженні матеріалу в млин матриця подрібнення, що базується на записаних АС моніторингу процесу, має вигляд:

$$G = \begin{bmatrix} 1 - S_1 \Delta t & 0 & \dots & 0 \\ S_1 b_{21} \Delta t & 1 - S_2 \Delta t & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_1 b_{m1} \Delta t & S_2 b_{m2} \Delta t & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & \dots & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{m1} & g_{m2} & g_{m3} & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Система працює наступним чином. Під час завантаження матеріалу на початковому етапі сигнали мають відносно підвищену амплітуду. Нехай початкові значення класів амплітуд були виражені вектором стовпцем: $A_n^0 = (A_{n1}^0 \ A_{n2}^0 \ \dots \ A_{nm}^0)^T$, де індекс T позначає транспонування. У початковий момент $k = 0$ вважаємо $A^0 = A_n^0$. Тоді зміна амплітуди записаних сигналів у ході подрібнення за крок часу переходу згідно комірковій моделі обчислюється з матричної рівності:

$$A^{k+1} = GA^k. \quad (24)$$

Число переходів k обчислюється з виразу $k = t / \Delta t$, де t – дискретний час перебування матеріалу в млині. Руйнування часток, при якому з'являються сигнали з амплітудою A_i , відбувається при питомій потужності енергії сигналів:

$$P(A) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^m n_i A_i^2. \quad (25)$$

Для опису струминного подрібнення на основі записаних у ході моніторингу АС матриця подрібнення має вигляд трикутної діагональної матриці з елементами $P_{i,j}$ де $P_{i,j}$ – величина питомої потужності сигналу в кожній i комірці (тобто піддіапазоні сигналів з величиною амплітуди A_i на j переході).

Вираз для визначення селективної й розподільної функції подрібнення має вигляд:

$$S_i = \frac{1 - P_{i,j}}{\Delta t}, \quad b_{k,i} = \frac{P_{k,i}}{S_i \Delta t}. \quad (26)$$

Результати верифікації математичної моделі співпадають із установленими раніше зв'язками акустичних сигналів і дисперсністю одержуваного продукту при струминному подрібненні ($R = 98,5\%$).

Результати моделювання струминного подрібнення перевірені експериментальними дослідженням струминного подрібнення матеріалів різних фізико-хімічних властивостей із застосуванням акустичного моніторингу процесу. Випробування проводилися на експериментальних стендах та промисловому млині №7 ВГМК (див. рис. 6). Розроблено апаратну систему акустичного моніторингу із хвилеводами, п'єзокерамічними датчиками, встановленими всередині млина й у трубопроводі на виході із класифікатора, аналого-цифровим перетворювачем, що з'єднано з комп'ютером.

Виходячи з фізичної суті процесу струминного подрібнення, було визначено й вивчено наступні режими: початок завантаження струменів матеріалом 1, оптимальний робочий режим 2, режим розвантаження - режим 3 і режим 4 - перевантаження струменів, за яким може наступити “завал” помольної камери.

Установлено зв'язки акустичних параметрів з режимами подрібнення. Зміна режиму струминного подрібнення, включаючи подачу в струмені матеріалу,

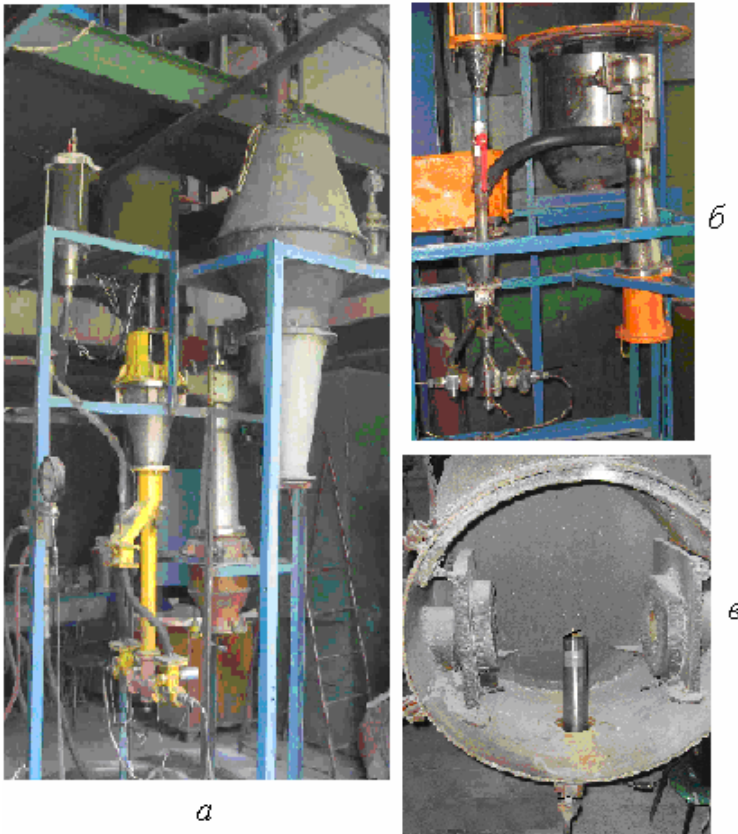


Рис. 6 – Загальний вигляд лабораторних установок продуктивністю 20 кг/г (а), 0,2 кг/г (б) і промисловий млин ВГМК з хвилеводом (в)

різні стани струменів щодо вмісту твердої фази й динамічності руйнування часток, обумовлюють зміни амплітудних розподілів акустичних сигналів у зоні подрібнення (рис. 7а).

Встановлено, що підвищення рівня акустичної активності зони помелу на будь-якій стадії є чинником росту числа ударів часток і, отже, інтенсифікації подрібнення й збільшення продуктивності млина (див. рис. 7б, 8).

Але продуктивність подрібнення залежить від своєчасності й ступеня завантаження струменів матеріалом. На рис. 8, 9 подача порцій матеріалу позначена стрілками. При цьому параметри енергоносія, режим класифікації, крупність вихідного продукту підтримувалися на незмінному рівні.

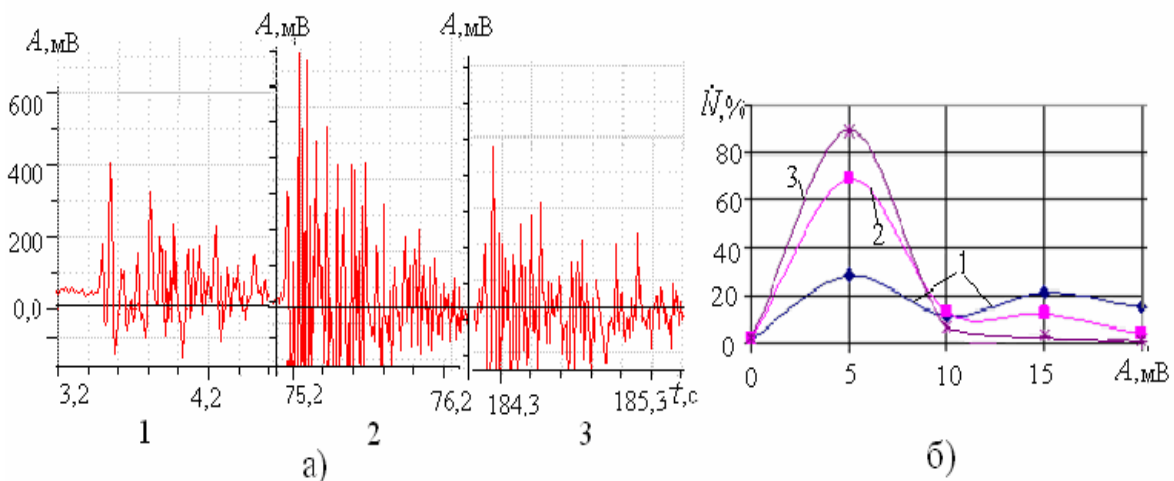


Рис. 7 – Кінетика амплітуд (а) і активності (б) АС у зоні подрібнення шамоту на різних стадіях процесу: 1 - завантаження, 2 - робочий режим, 3 – розвантаження

Максимальна продуктивність спостерігалася при регулярному завантаженні, але не перевищувала продуктивність в оптимальному режимі (крива на рис. 9). Продуктивність млина відхиляється від максимального рівня у випадках перевищення оптимального насичення струменя матеріалом (режим пере-

вантаження) і також при розвантаженні струменя, а кінетика зміни ефективності процесу простежується кутом нахилу графіка $\lg \dot{N} = f(t)$ (див. рис. 8).

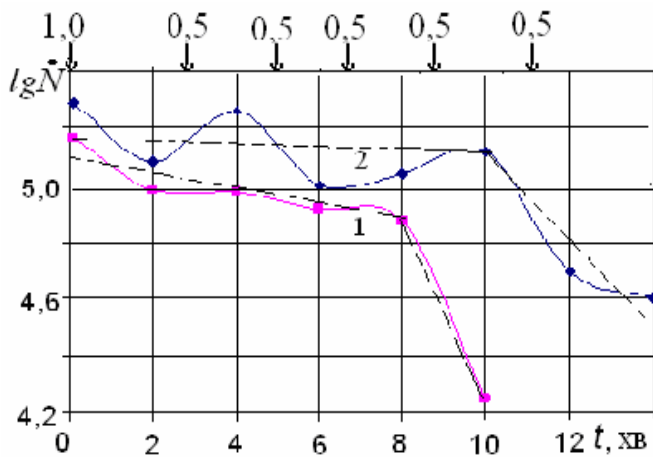


Рис. 8 – Зміна акустичної активності зони подрібнення при разовому (1) і багаторазовому (2) завантаженні

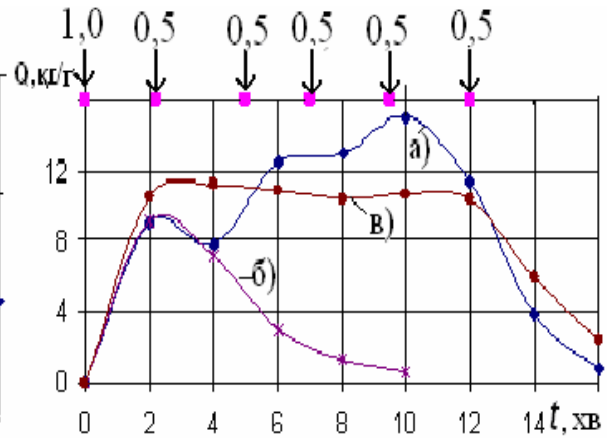


Рис. 9 – Зміна продуктивності струминного млина в різних режимах завантаження матеріалом

Визначено закономірності зміни амплітуд АС і їхні розподіли залежно від розміру часток, що завантажуються, і дисперсності готового продукту. Максимальні значення амплітуд АС на початку робочого режиму подрібнення (перші секунди) корелюють із розміром часток, що подрібнюються (див. рис. 10 а), тоді як при завершенні стадії розвантаження струменів – максимальна амплітуда

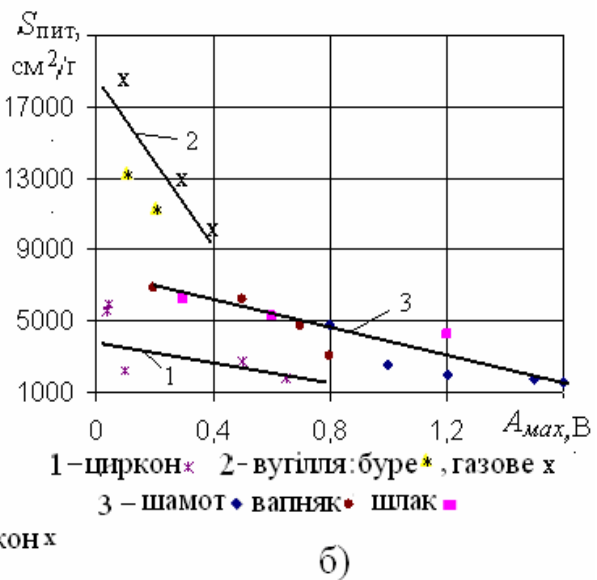
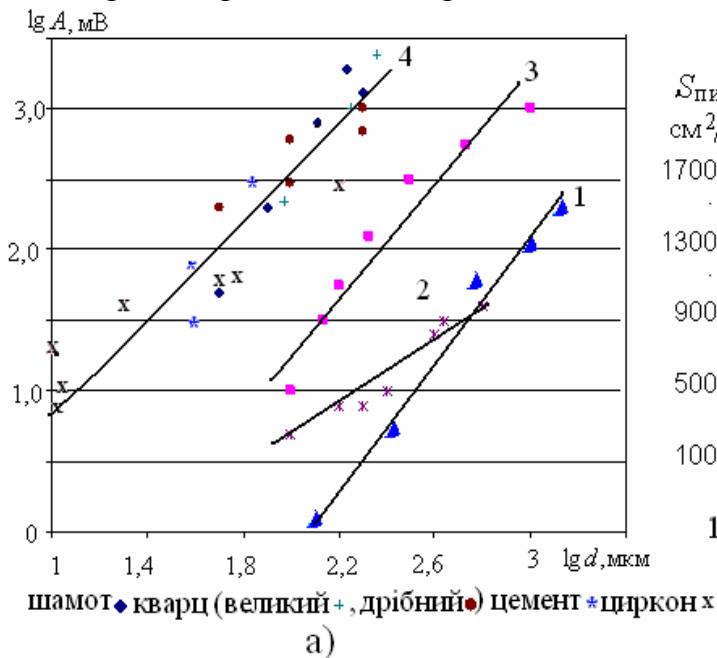


Рис. 10 – Залежності максимальної амплітуди АС від розміру часток, що подрібнюються, (а: 1 - діабазу, 2 - скляних волокон, 3 - перемичок між порами в пористому склі, 4- шамоти, кварцу, цементу й циркону при струминному подрібненні) і дисперсності матеріалу (б)

АС обернено пропорційна дисперсності $S_{пит}$ здрібненого продукту (див. рис. 10 б). Результати досліджень узагальнені на рис. 10 а) у вигляді логариф-

мічної залежності амплітуди АС від розміру часток матеріалу $lg A(мВ) = f(lg d)(мкм)$, де наведено результати експериментів з подрібнення твердих матеріалів і різних видів руйнувань (1 – стиск (0,1-2 мм); 2 – розрив (0,1-2 мм); 3 – стиск (0,1-1мм); 4 – подрібнення струминне (0,04-1,1 мм).

Кут нахилу залежності $A(d)$ змінюється зі зміною щільності матеріалу, що подрібнюється, і типу навантаження: чим вище густина речовини за інших рівних умов (більше маса частки), тим значніше вплив розміру часток на величину амплітуди АС. Цей вплив є найбільш вагомим при крупності часток вище 0,2 мм. Встановлено трипараметричну залежність величини максимальної амплітуди A_{max} (мВ) від розміру d (мкм) часток здрібненого продукту й щільності ρ (г/см³) матеріалу у вигляді

$$A_{max} = d \cdot 10^{0,4\rho+0,3}, (R = 0,8 - 0,9). \quad (26)$$

Таким чином, знаючи дві величини – максимальну амплітуду A_{max} у зоні подрібнення й щільність ρ матеріалу, можна прогнозувати очікуваний розмір d часток готового продукту.

Підвищення дисперсності порошку, що подрібнюється, супроводжується зменшенням максимальної величини амплітуди A_{max} і ростом частки малоамплітудних сигналів. На рис. 11 показано залежності A_{max} і відносної частки $\dot{N}(A_{40})$ сигналів з амплітудою менш 40 мВ від S_{num} .

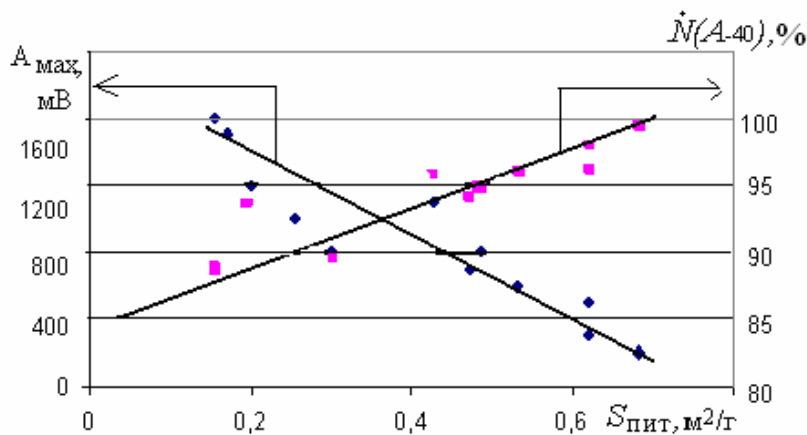


Рис. 11 – Залежності величини максимальної амплітуди й частки малоамплітудних сигналів від питомої поверхні здрібнених матеріалів щільністю 2,8 – 3,0 г/см³.

показником дисперсності S_{num} , (м²/г) можна описати рівняннями:

$$\dot{N}(A_{40}) = 16 \cdot S_{num} + 87, \quad A_{40} = 1749 - 2172 \cdot S_{num} \quad (27)$$

з вірогідністю апроксимації, відповідно: $R = 0,87$ і $R = 0,93$.

Таким чином, в ході наведених досліджень була вирішена третя задача й обґрунтоване четверте наукове положення.

У п'ятому розділі приведено рішення четвертої задачі та розроблено методи ідентифікації режимів тонкого подрібнення на основі використання інформаційних технологій для аналізу результатів акустичного моніторингу стру-

Встановлено, що процес нагромадження в спектрах акустичних сигналів з малими значеннями амплітуд (порядку 5-20 мВ) характеризує переважний вміст у струмені часток малих розмірів, тобто переважні в кінетиці подрібнення ефектів диспергування матеріалу.

При щільності 2,8 – 3,0 г/см³ зв'язку акустичних параметрів A_{max} , мВ, $\dot{N}(A_{40})$, % з

минного подрібнення. Визначено інформаційні частоти й амплітуди сигналів зони подрібнення різних матеріалів, за якими можна судити про режим подрібнення й рівень завантаження млина матеріалом, прогнозувати його продуктивність.

Створено базу даних основних технологічних і акустичних параметрів процесу тонкого подрібнення сипучих матеріалів, що включає інформативні технологічні й акустичні параметри: тиск P і температура T енергоносія, число обертів n двигуна класифікатора, щільність ρ матеріалу, регіон одержання або видобутку його, вихідну крупність d_0 матеріалу, усереднену крупність отриманого продукту \bar{d} й акустичні параметри моніторингу процесу – амплітуду A , частоту f , активність N акустичних сигналів. Таким чином, вектор стану представлено у загальному вигляді:

$$\bar{X} = \{ p, t, n, \rho, G, A, f, N \}. \quad (28)$$

З використанням бази даних параметрів стану проведено математичне моделювання струминного подрібнення на базі нейронної мережі виду множинної логістичної регресії. Для навчання нейронної мережі використався метод зворотного поширення погрішності. Систему була навчена й протестована на селективній вибірці процесу струминного подрібнення, оцінка адекватності моделі проводилася за допомогою ROC-аналізу.

Для аналізу акустичних характеристик вибиралися сигнали за інтервали 0,1 с у різних режимах подрібнення. Весь спектр частот розбивався на 500 класів із 195 частот у кожному. Установлено, що розподіл характеристик режиму без завантаження матеріалу й робочого режиму подрібнення значно відрізняються.

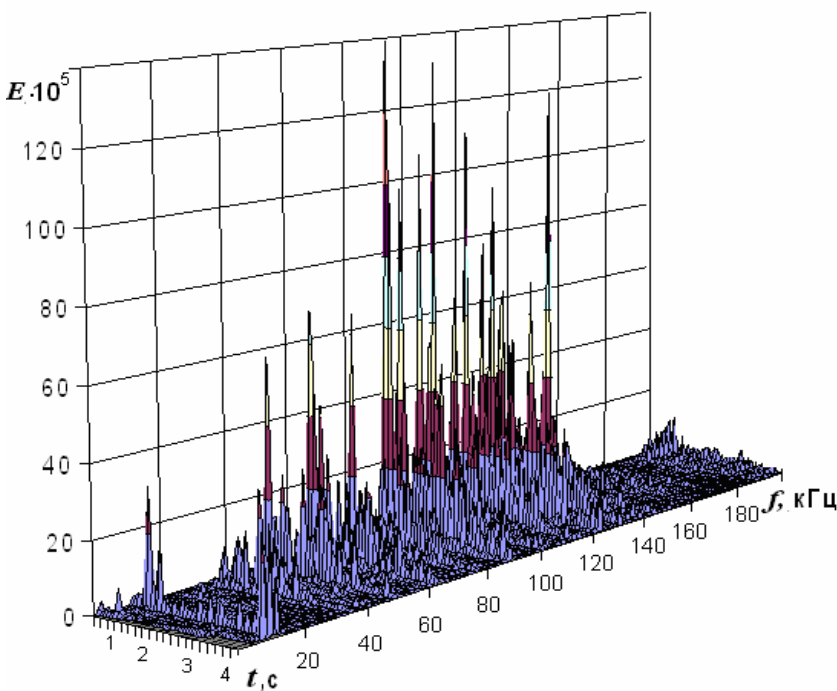


Рис. 12 – Розподіл енергії АС за частотними смугами у режимах: початок завантаження матеріалу $-0 \leq t \leq 1$ хв; робочий режим $1 \leq t \leq 3,5$, хв; розвантаження $3,5 \leq t \leq 4$, хв.

Визначено інформативні частоти (при частоті реєстрації АС 200 кГц) і побудовано модель на відповідному діапазоні інформативних частот ($69 \text{ кГц} \leq f \leq 72 \text{ кГц}$). Навчання нейронів такої моделі здійснювалося значно швидше, і при ROC-аналізі адекватності моделі показники специфічності були вищі, що говорить про правильність розпізнання стану розвантаження млина. Дослідження інформативних частот проведено при подрібненні різних матеріалів. На рис. 12 показана зміна енергії

сигналів різної частоти в ході струминного подрібнення кварцового піску. Вивчення енергетичної характеристики АС показало, що найбільшу енергію мають сигнали робочого режиму, режиму диспергування часток.

При частоті реєстрації сигналів 400кГц, спектр інформативних було визначено як $65\text{кГц} \leq f \leq 125\text{кГц}$. У робочому режимі подрібнення $1\text{с} \leq t \leq 3,5\text{с}$ (див. рис. 12) величина амплітуд АС більше, ніж на початковому етапі завантаження й на заключному етапі подрібнення, тобто при недовантаженому млині. Особливо це характерно для сигналів із частотою, що попадає в діапазон інформативних.

Запропоновано наступні алгоритми керування цим процесом. Спосіб керування процесом, оформлений патентом України, заснований на порівнянні амплітуд АС. На початковому етапі процесу подрібнення задаються критичні величини $A_{кр}$ амплітуд цих сигналів. Наближення амплітуди до контрольної величини позначає перехід робочого режиму подрібнення до неповного завантаження млина, а подальше зменшення величини амплітуди до $A < A_{кр}$ веде до зупинки процесу подрібнення. Тому, при керуванні процесом подрібнення умова $A \approx A_{кр}$ є необхідною умовою додаткового завантаження млина для продовження подрібнення матеріалу в оптимальному робочому режимі.

У ході вивчення особливостей поведінки сигналів у характерних місцях установки для подрібнення розроблено алгоритм оптимізації, що базується на

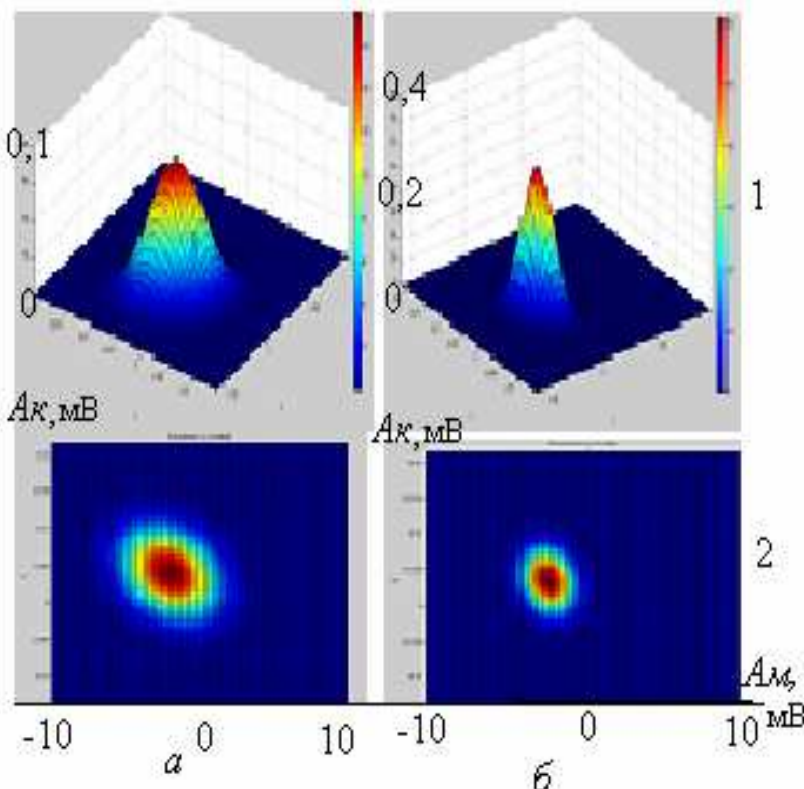


Рис. 13 – Функції щільності ймовірності розподілу амплітуди

вимірів, регуляризацію й аналіз амплітудних складових, придушення шуму в акустичному сигналі за допомогою вейвлет-аналізу, відновлення радіальної ба-

візуалізації просторової моделі з використанням вейвлет аналізу. За даними спостережень виду $\{t_i, A_i^m, A_i^k; i=1, N\}$, де N - кількість записів сигналів у секунду ($i=1, N$); двійки $\{t_i, A_i^m; i=1, N\}$ й $\{t_i, A_i^k; i=1, N\}$ і визначають амплітуду сигналу в млині й після класифікатора млина, відповідно, будуватиметься наближення функції $p(A^m, A^k)$, реалізацією якої є масив амплітуд сигналів акустичного моніторингу.

Методика візуалізації включає збір і наповнення бази даних акустичних

зисної функції типу Гауса $p(A^m, A^k)$, аналіз відновлених функцій Гауса для різних режимів подрібнення. Базуючись на спільному аналізі амплітуди сигналів датчиків у двох характерних зонах установки, введено функцію щільності ймовірності розподілу амплітуд, поводження якої дозволяє судити про стан завантаженості млина. На рис. 13 показано форму поверхні й розташування проекції функції щільності ймовірності розподілу амплітуди для двох режимів завантаження струменів матеріалом при подрібненні циркону: робочий режим подрібнення (а) і недостатнє завантаження струменів матеріалом (б). Створення візуалізації просторової акустичної моделі дало можливість наочно, на основі обмеженої кількості вихідних експериментальних даних, судити про наповненість струменів матеріалом і приймати рішення щодо оптимізації процесу.

Вейвлет-аналіз АС також дозволив ідентифікувати стан процесу й оцінити його стійкість. Вейвлет-розкладання АС вейвлетом Добеши-4 до третього рівня показало наявність залежності частоти від часу всіх досліджуваних АС. У той же час дослідження середньоквадратичних відхилень отриманих вейвлет-коефіцієнтів, що деталізують, і відновлених компонентів сигналу млина в режимі недостатнього завантаження й робочому режимі показали, що вейвлет-коефіцієнти двох різних режимів розрізняються майже у два рази. Тому вони досить добре визначають ступінь заповнення млина. На цій властивості сигналів базується запропонований спосіб контролю ефективності подрібнення.

У результаті досліджень була вирішена четверта задача щодо розробки на основі використання інформаційних технологій системи візуалізації результатів акустичного моніторингу та ідентифікації режимів струминного подрібнення.

У шостому розділі представлено результати вирішення п'ятої задачі, розробки й пропозиції щодо практичної реалізації акустичної оптимізації тонкого подрібнення.

Для оцінки зв'язків технологічних і акустичних параметрів струминного подрібнення запропоновані наступні критерії роботи млина:

$$K_{ef} = G / \dot{N}_{\Sigma} - \text{критерій ефективності подрібнення, (г/імп),}$$

$$K_{opt} = A_{max} \cdot \dot{N}_{\Sigma} - \text{критерій оптимальності, (В/с);}$$

$$K_S = K_{ef} \cdot S_{nut} - \text{критерій ефективності диспергування, (см}^2\text{/імп);}$$

$$K_{\alpha} \approx N / N_{вант} - \text{коефіцієнт циркуляції матеріалу;}$$

$$E_{подр} = \dot{N}_{\Sigma} / G - \text{акустичний показник енергоємності подрібнення, (імп/г);}$$

$$E_{дист} = E_{подр} / S_{nut} - \text{акустичний показник енергоємності диспергування, (імп/см}^2\text{).}$$

Ефективність струминного подрібнення оцінювалася коефіцієнтом K_{ef} , що характеризує ступінь наближення процесу подрібнення до оптимальних умов, при яких $K_{ef} = 0,8-0,9$ (для шамоту, рис. 14 в). Критерій оптимальності K_{opt} характеризує акустичний ефект трансформації кінетичної енергії прискорених струменями часток в акустичну енергію тріщиноутворення при руйнуванні часток ударами, що характеризує енергонапруженість руйнування часток у струменях. На рис. 14е) позначені межі оптимальності процесу на основі оцінки

критерію оптимальності: оптимальна величина $K_{onm} = (19-35) \cdot 10^3$ В/с, припустима $K_{onm}^{nprun} = (6-17) \cdot 10^3$ В/с і неприпустима $K_{onm}^{nenprun} = (0,4-6) \cdot 10^3$ В/с (рис. 14 д). K_u є величиною порядку одиниці, тоді як в умовах переповнення струменів становить величину порядку 2 - 4, а при їхньому надмірному розвантаженні – менше 1 (рис. 14 д).

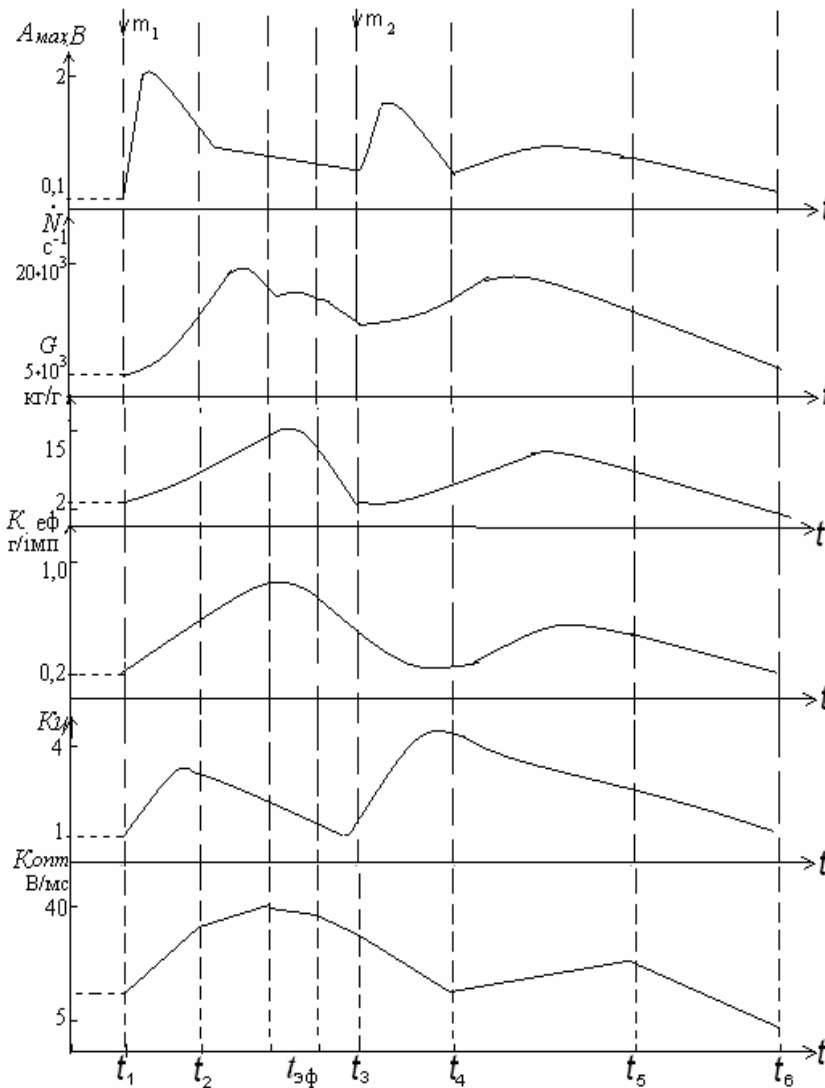


Рис. 14– Схематичне зображення інформативних акустичних і технологічних параметрів процесу

- а) Для оцінки ефективності пропонується також питомий коефіцієнт ефективності, що обчислюється як відношення коефіцієнта ефективності до площі вихідного перетину розгінної трубки. Так, величина питомого коефіцієнта ефективності промислового млина при $S_{num} = 0,16 - 0,21$ м²/г становить $K_{ef}^{num} = 1,93 \cdot 10^{-5}$, лабораторного млина – $K_{ef}^{num} = 0,6 \cdot 10^{-5}$. При більш тонкому подриненні (-45мкм, $S_{num} = 0,26 - 0,55$ м²/г), ці коефіцієнти знижуються: для промислового млина – $K_{ef}^{num} = 1,27 \cdot 10^{-5}$ і лабораторного – $K_{ef}^{num} = 0,25 \cdot 10^{-5}$.
- б)
- в)
- г)
- д)
- е)

Таким чином, величина K_{ef}^{num} для промислового млина вище в 3 – 5 разів у порівнянні з лабораторними умовами.

Встановлені закономірності дозволяють прогнозувати акустичну енергоємність подрібнення $E_{подр}$ (імп/г) і диспергування $E_{дисп}$ (імп/см²). На рис. 15 ілюструються тенденції зниження питомих акустичних енерговитрат $E_{подр}$ і $E_{дисп}$ з підвищенням продуктивності млина.

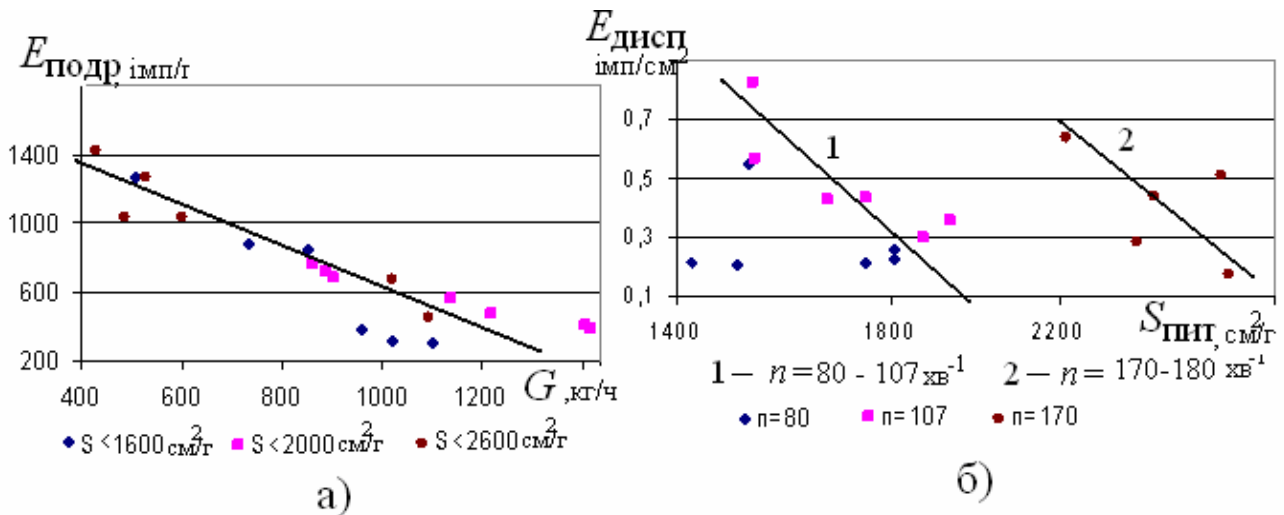


Рис. 15 – Залежності акустичної енергоемності подрібнення (а) від продуктивності млина й диспергування (б) від рівня дисперсності продукту

Значення акустичної енергоемності подрібнення $E_{\text{подр}}$ і диспергування $E_{\text{дисп}}$ відрізняються для оптимального й неоптимального режиму подрібнення. У промислових умовах при зміні продуктивності G від 800 до 1400 кг/г ($n = 80 - 107 \text{ хв}^{-1}$) різниця в енерговитратах становить величину $\Delta E_{\text{подр}} = 843 - 381 = 462 \text{ імп/г}$. В оптимальних умовах диспергування питомі енерговитрати зменшуються в 2,5 рази.

Приводячи до реальних енерговитрат (потужність привода компресора становить $N = 285 \text{ кВт}$, продуктивність $G_{\text{опт}} = 1,4 \text{ т/г}$, $G_{\text{неопт}} = 0,7 \text{ т/г}$), економія енергії на процес подрібнення може скласти до 190 кВт-г/т при $S_{\text{пнт}}$ порядку 1600 – 1800 см²/г, а на процес утворення нової поверхні продукту ($\Delta S_{\text{пнт}} = 800 - 1000 \text{ см}^2/\text{г}$) може скласти до 140 кВт-г/т. Лінійні зв'язки питомих технологічних і акустичних показників енерговитрат простежуються на рис.16:

$$\begin{aligned} E_{\text{пнт}} &= 0,42E_{\text{подр}} + 52,26, \quad (R = 0,96), \\ E_S &= 0,004E_{\text{дисп}} + 0,002, \quad (R = 0,96). \end{aligned} \quad (29)$$

Вигляд кращого енергетичного показника ($E_{\text{пнт}}$, E_S) пов'язаний з технологічним завданням: досягненням максимальної продуктивності млина (рис. 16а) або підтримкою максимальної дисперсності продукту (рис. 16 б).

На рис. 17 показано варіант алгоритму акустичного моніторингу, що реалізовано в умовах ВГМК при подрібненні циркону. Пропонований алгоритм контролю оптимальності (рис. 18) роботи млина включає необхідні технологічні параметри (P , n , t) і гранично припустимі акустичні критерії й показники роботи струминного млина: $K_{\text{опт}}$, $K_{\text{еф}}$, $K_{\text{ц}}$, $E_{\text{дисп}}$, $E_{\text{дисп}}$.

На основі зіставлення розрахункових поточних величин критеріїв із заданими визначаються подальші дії з регулювання технології. Використання системи оптимізації процесу на основі акустичного моніторингу дозволить забез-

печити підвищення продуктивності млина на 50 - 70 % залежно від дисперсності здрібненого продукту (питома поверхня в діапазоні $S_{num} = 1540 - 2500 \text{ см}^2/\text{г}$).

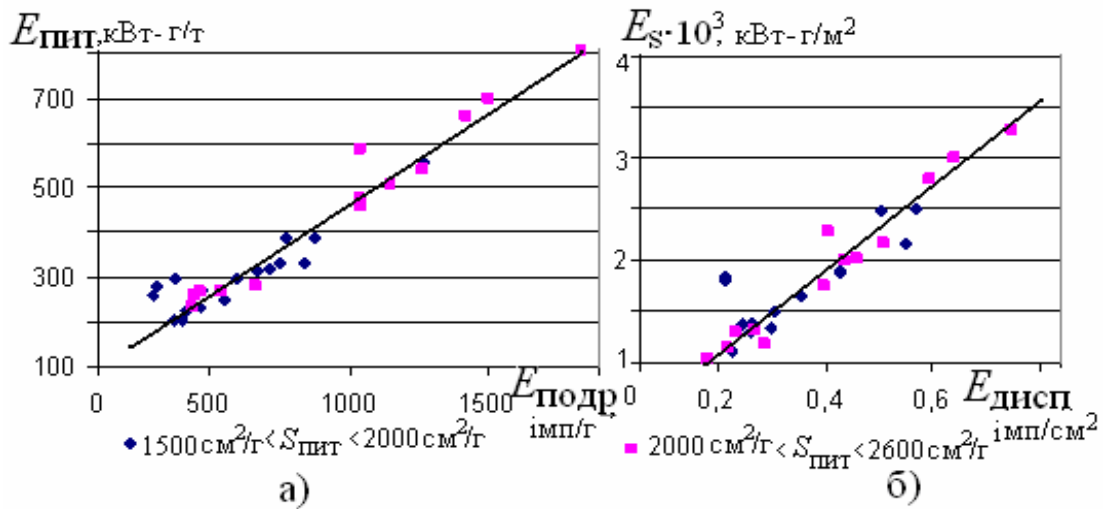


Рис. 16 – Зв'язок питомих технологічних і акустичних показників енерговитрат на подрібнення й диспергування.

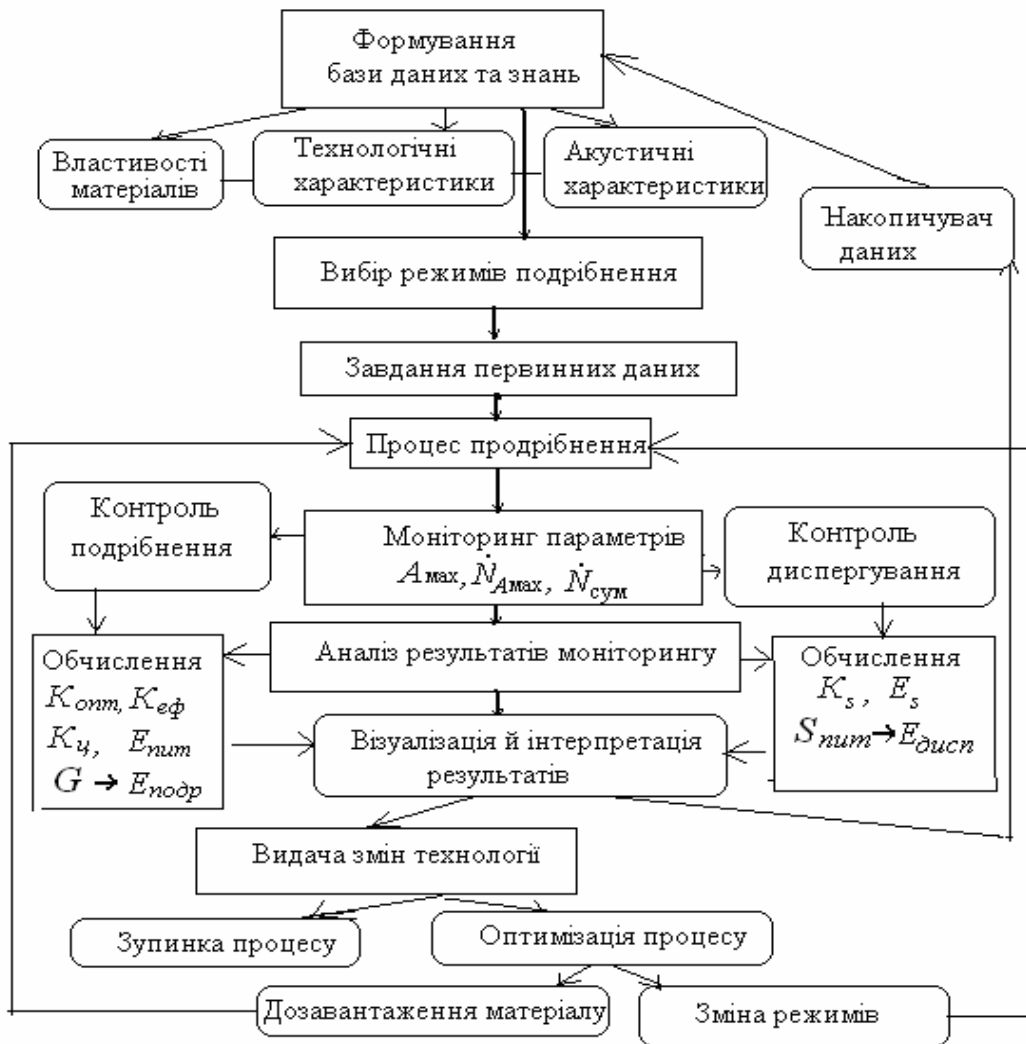


Рис. 17 – Алгоритм акустичного моніторингу процесу подрібнення.

Проведені дослідження дозволили вирішити п'яту задачу та встановити п'яте наукове положення.

Запропонована система оптимізації струминного подрібнення захищена 4 патентами України на винахід і випробувана в промислових умовах подрібнення циркону, одержавши підтвердження актом впровадження. На прикладі роботи промислового струминного млина з одержанням цирконового концентрату крупністю 63 мкм встановлено зниження енергоспоживання в 2-2,5 рази шляхом оптимізації завантаження струменів енергоносія і підтримки на мінімальному рівні питомої поверхні готового продукту. Робота млина в оптимальному режимі дозволила зменшити його енергоспоживання на 150-200 кВт-г/т для тонкодисперсного продукту при досягненні продуктивності 800-1400 кг/г. Впровадження системи оптимізації процесу на основі акустичного моніторингу забезпечило підвищення продуктивності млина на 50 – 70 % в залежності від дисперсності одержаного продукту (питома поверхня в діапазоні $S_{num} = 1540 - 2500 \text{ см}^2/\text{г}$). Річний розрахунковий економічний ефект складе величину порядку 185 – 507 тис. грн., відповідно для готового подрібненого циркону крупністю 63 і 45 мкм.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена важлива **наукова проблема** встановлення закономірностей та механізму формування гранулометричного складу продуктів тонкого подрібнення для досягнення необхідної дисперсності продукту при мінімальному енергоспоживанні.

На основі цих закономірностей розроблені моделі тонкого подрібнення та запропонований новий підхід до аналізу й оптимізації процесу на основі зв'язків технологічних параметрів і емісійних ефектів подрібнення, а також використання інформаційних технологій для ідентифікації процесу. Все це дало можливість обґрунтувати й розробити методи оптимізації процесу, у результаті чого досягнуто необхідні технологічні показники при зниженні енергоємності й дотриманні необхідної контрольної дисперсності продуктів подрібнення.

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

1. Встановлено існування критичного рівня енергоємності тонкого подрібнення, що обумовлюється способом подрібнення й пов'язаний з розмірами часток (порядку 10-25 мкм) готового продукту. Приближення до критичного рівня характеризується різким збільшенням енергоємності подрібнення і означає граничні можливості механічного розкриття корисних компонентів і збагачення. Для виключення переходу величини енергоємності через критичну величину необхідно здійснювати управління процесом тонкого подрібнення, наприклад, з використанням математичного моделювання й інформаційних технологій.

2. Розроблено науковий підхід до зниження питомих енерговитрат у замкнутих циклах тонкого подрібнення, що включає вибір оптимального режиму класифікації за крупністю завантаження млина більше (E^I) і менше (E^{II}) контрольного класу. Це дозволило встановити величину питомих енерговитрат q_a^V за-

знову утвореним класом a як характерну константу млина при подрібненні даної руди й рекомендовано використовувати її в рівнянні кінетики подрібнення, а також для розрахунку продуктивності замкнутих циклів подрібнення.

3. Доведено незалежність кінетики подрібнення фракцій у суміші сипучих матеріалів, що дозволяє прогнозувати гранулометричний склад продукту подрібнення від часу, а на цій основі обґрунтовувати технологічні схеми й вибір подрібнювачів.

4. Встановлено, що максимальний вихід заданого класу крупності в апаратах з накопиченням матеріалу досягається за умови дискретної подачі матеріалу, при цьому період дискретності залежить від швидкості утворення необхідного класу крупності. При моделюванні процесу подрібнення кварцового піску в струминному млині при дискретному завантаженні продуктивність збільшилась на 1,4%.

5. Створено динамічну модель кінетики зміни гранулометричного складу матеріалу у зоні подрібнення, яка дозволяє визначати тривалість подрібнення для одержання заданого виходу контрольного класу й розробити систему управління продуктивністю млина згідно величини коефіцієнта перездрібнювання. Встановлено, що продуктивність млина залежить, за інших рівних умов, від співвідношення окремих фракцій у загальному об'ємі матеріалу до й після подрібнення. Це дозволило розробити оптимізаційний критерій керування продуктивністю млина на основі контролю гранулометричного складу та визначення питомої поверхні продукту.

6. У результаті досліджень було встановлено взаємозв'язки основних технологічних і акустичних параметрів, виявлено наступні закономірності акустичного випромінювання струминної установки:

- амплітуда акустичних сигналів і її розподіл за величиною характеризують ступінь завантаження струменів твердою фазою; надлишкове завантаження струменів матеріалом супроводжується зменшенням амплітуди акустичного випромінювання, що вказує на зниження динамічності подрібнення;

- підвищення рівня акустичної активності зони помелу на будь-якій стадії є чинником росту числа ударів часток і, отже, інтенсифікації подрібнення й збільшення продуктивності млина;

- встановлена трипараметрична залежність величини максимальної амплітуди A_{max} (мВ) від розміру d (мкм) часток здрібненого продукту й щільності ρ (г/см³) матеріалу у вигляді $A_{max} = d \cdot 10^{0,4\rho+0,3}$, ($R = 0,8 - 0,9$), що дозволяє прогнозувати очікуваний розмір d часток готового продукту.

7. Новий метод оптимізації процесу струминного подрібнення розроблений на основі акустичного моніторингу тонкого подрібнення. Система оптимізації роботи струминного млина базується на безперервному моніторингу акустичних параметрів (\dot{N}_{Σ} , A_{max}), використаних для прогнозування енергоємності диспергування $E_{дисп}$ й подрібнення $E_{подр}$. Оптиміальні параметри в процесі роботи млина реалізовані шляхом контролю акустичних параметрів зони по-

дрібнення й керуванням завантаженням матеріалу на основі пошуку оптимальної насиченості струменів твердою фазою.

8. Створена коміркова модель процесу струминного подрібнення, що основана на результатах акустичного моніторингу й дозволяє ідентифікувати режим подрібнення. Результати верифікації математичної моделі співпадають із установленими зв'язками акустичних сигналів і дисперсністю одержаного продукту при струминному подрібненні ($R = 98,5\%$).

9. Система візуалізації й ідентифікації режимів струминного подрібнення розроблена на основі результатів акустичного моніторингу й використання інформаційних технологій і дозволяє при мінімальній кількості початкових експериментальних даних виконати вибір оптимальних параметрів процесу струминного подрібнення для різних матеріалів і технологічних режимів.

10. Визначені основні комплексні технолого-акустичні критерії подрібнення: критерій оптимальності, ефективності подрібнення й диспергування, коефіцієнт циркуляції, що значною мірою дозволяють контролювати і оптимізувати подрібнення в ході його процесу.

Розроблений метод оцінки енерговитрат при струминному подрібненні, основу якого становлять зв'язки технологічних, акустичних і енергетичних показників енергоємності у різних межах дисперсності готового продукту. Експериментально встановлений вигляд рівнянь для технологічного енергетичного показника подрібнення, що базується на зв'язках питомих технологічних і акустичних показників енерговитрат і обумовлені технологічним завданням: досягненням максимальної продуктивності млина або підтримкою максимальної дисперсності продукту.

11. Результати теоретичних досліджень підтверджені експериментальною перевіркою струминного подрібнення в лабораторних і промислових умовах. Результати використання акустичної оптимізації промислового млина ВГМК показало можливість підвищення його продуктивності до 50% , що визначило річний розрахунковий економічний ефект 185-507 тис. грн. в залежності від контрольної крупності цирконового концентрату.

Основні публікації стосовно теми дисертації:

1. Прядко Н.С. Акустические исследования струйного измельчения / LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2013. – Saarbrücken Germany. – 172 с.
2. Pryadko N. S. Research of acoustic monitoring regularities in a jet grinding process / P.I. Pilov, L.J. Gorobets, N.S. Pryadko // Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences. – 2009. – Vol. 54 (2009). – № 4. – P. 841 – 848 (база даних Scopus).
3. Pryadko N. Application of wavelet transform in analysis of jet grinding process / A. Mikhalyov, N. Pryadko, R. Suhomlin, A. Kotyra // Elektronika. – Lublin. – 2013. – № 8. – P. 20 – 22 (база даних Scopus).
4. Pryadko N.S. Optimization of fine grinding on the acoustic monitoring basis / N. S. Pryadko // Power Engineering, Control & Information Technologies in Geotechnical Systems.– Taylor & Francis Group, London, 2015.– P. 99-108 (база даних Scopus).
5. Прядко Н.С. Акустические и технологические характеристики процесса из-

- мельчения в струйной мельнице / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Н.С. Прядко // Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – № 4. – С. 115 – 121.
6. Прядко Н.С. Выбор критической плотности энергии при тонком измельчении / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Н. С. Прядко // Обогащение руд. – 2007. – № 5. – С. 120 – 123.
7. Прядко Н.С. Акустический метод исследования процесса измельчения / Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Н.С. Прядко // Обогащение руд. – 2013. – № 3. – С. 30 – 37.
8. Прядко Н.С. О механической активации компонентов твердеющей закладки для заполнения выработанного пространства рудников / М.В. Петлеваный, Н.С. Прядко, А.М. Кузьменко, Л.Ж. Горобец, В.Ю. Усатый // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – Вып. 3. – С. 75 – 78 (база Scopus, Index Copernicus, «Ulrich's Periodicals Directory», ВИНТИ РАН).
9. Прядко Н. С. Моделирование замкнутых циклов измельчения руд на основе баланса контрольного класса крупности // П. И. Пилов, Н. С. Прядко // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 6. – С. 75 – 80 (база Scopus, Index Copernicus, «Ulrich's Periodicals Directory», ВИНТИ РАН).
10. Прядко Н.С. Акустико–эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения / Н.С. Прядко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 6. – С. 46 – 52 (база данных Scopus).
11. Прядко Н.С. Возможности акустического прогнозирования гранулометрии частиц при струйном измельчении / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, К.А. Левченко, Т.Ю. Машкова, И.В. Верхоробина // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – Вып. 52 (1094). – С. 10 – 18 (база данных «Ulrich's Periodicals Directory»).
12. Прядко Н.С. Имитационная модель кинетики тонкого измельчения материалов / Н.С. Прядко, Г.М. Саксонов, Е.В. Терновая // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – Вып. 53 (1095). – С. 89 – 97 (база данных «Ulrich's Periodicals Directory»).
13. Прядко Н.С. Застосування акустоемісійного моніторингу щодо струменевого подрібнення / Л.Ж. Горобець, І.В. Верхоробина., Н.С. Прядко, Г.О. Стрельников // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2006. – № 40. – С. 69 – 74.
14. Прядко Н.С. Механоактивация при измельчении полезных ископаемых / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.В. Гаевой, Н.С. Прядко, И.А. Шуляк // Вестник КТУ. – 2007. – № 16. – С. 59 – 65.
15. Pryadko N.S. An acoustic monitoring of the sizes changes of grinded particles / P.I. Pilov, L.J. Gorobets, V.N. Bovenko, N.S. Pryadko // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 6. – С. 23 – 26.
16. Прядко Н.С. Влияние подогрева энергоносителя на характеристики газоструйного измельчения / Н.С. Прядко, Н.Д. Коваленко, Г.А. Стрельников, М.Т. Гупало // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 38. – С. 146 – 155.
17. Прядко Н.С. Исследование технологических и акустических характеристик струйного измельчения шамота / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, Г.А. Стрельников // Научные труды Дон НТУ, серия горноэлектромеханическая. – 2008. – № 14. – С. 158 – 164.

18. Прядко Н.С. Стохастическая модель газодинамического измельчения / Н.С. Прядко // Техническая механика. – 2008. – № 1. – С. 121 – 131.
19. Прядко Н.С. О повышении эффективности процесса струйного измельчения с использованием акустического мониторинга / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, Н.С. Прядко, И.В. Верхоробина // Вестник НТУ «ХПИ». – 2009. – № 25. – С. 74 – 82.
20. Прядко Н.С. Интенсификация процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, И.А. Шуляк, Ю.Г. Соболевская // Вибрации в технике и технологиях. – 2009. – № 2 (54). – С. 15 – 19.
21. Прядко Н.С. Анализ качества продукта струйного измельчения на основе акустического мониторинга / Н.С. Прядко // Техническая механика. – 2010. – № 2. – С. 81 – 86.
22. Прядко Н.С. Информационная технология получения тонкодисперсных материалов струйным измельчением / Н.С. Прядко, Т.М. Буланая, Л.Ж. Горобец, Ю.Г. Соболевская, Н.П. Сироткина // Системные технологии: региональный межвузовский сборник научных трудов. – 2010. – Вып. 3 (58). – С. 40 – 46.
23. Прядко Н.С. Акустические образы режимов струйного измельчения / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, Л.А. Цыбулько, В.В. Гаевой, И.В. Верхоробина // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010. – Вып. 65– С. 127 – 138.
24. Прядко Н.С. Исследование амплитудных распределений акустических сигналов процесса струйного измельчения / П.И.Пилов, Л.Ж.Горобец, Н.С. Прядко, Л.А. Цыбулько, Ю.И. Тюря // Разработка рудных месторождений. – 2011. – Вып. 94. – С. 266 – 268.
25. Прядко Н.С. Результаты акустического мониторинга промышленной струйной установки / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, И.В. Верхоробина, П.А. Бакум // Техническая механика. – 2011. – № 2. – С. 93 – 100.
26. Прядко Н.С. Акустические характеристики гранулометрических распределений частиц в процессе измельчения кварцевых песков / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2011. – № 45. – С. 336 – 340.
27. Прядко Н.С. Акустический мониторинг работы струйных мельниц различного типоразмера / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, Л.А. Цыбулько, И.В. Верхоробина // Вестник НТУ «ХПИ». – 2011. – Вып. 50. – С. 3 – 10.
28. Прядко Н.С. Моделирование процесса струйного измельчения на основе акустического мониторинга / Н.С. Прядко // Техническая механика. – 2012. – № 3. – С. 179 – 184.
29. Прядко Н.С. Исследование законов распределения, используемых для анализа продуктов измельчения / Н.С. Прядко, В.Ф. Пожидаев // Техническая механика. – 2012. – № 4. – С. 96 – 103.
30. Прядко Н.С. Сравнительный анализ методов вычисления крупности частиц продуктов измельчения / Н.С. Прядко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2012. – № 13 (184), ч. 2. – С. 134 – 139.
31. Прядко Н.С. Акустические параметры оптимизации процесса струйного измельчения / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко // Зб. наукових праць ПолНТУ. – 2012. –

Вип. 2 (32). – С. 128 – 136.

32. Прядко Н.С. Система анализа акустических сигналов газоструйной мельницы / Н.С. Прядко, Л.Ж. Горобець, Ю.Г. Соболевская, В.П. Краснопер, Р.А. Сухомлин // Збірник наукових праць НГУ. – 2013. – № 43. – С. 38 – 42.
33. Прядко Н.С. Моделирование кинетики тонкого измельчения в помольной камере / Н.С. Прядко // Техническая механика. – 2014. – № 2. – С. 93 – 100.
34. Прядко Н.С. Исследование скорости 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.
35. Прядко Н.С. Акустический метод оценки энергозатрат на струйное измельчение / Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, В.П. Краснопер, П.А. Бакум // Збагачення корисних копалин. – 2014. – № 56 (97). – С. 94 – 102.
36. Прядко Н.С. Кинетика измельчения смеси фракций крупности / П.И. Пилов, Н.С. Прядко, Е.В. Терновая // Збагачення корисних копалин. – 2014. – № 57 (98). – С. 101 – 106.
37. Прядко Н.С. Информационные технологии для управления тонким измельчением / Н.С. Прядко, Г.А. Стрельников // Техническая механика. – 2014. – №4. – С. 118 – 125.
38. Патент на винахід 98405 Україна, МПК В02С 25/00. Спосіб регулювання газоструминного подрібнення / Пілов П.І., Горобець Л.Ж., Коваленко М.Д., Стрельников Г.О., Прядко Н.С.; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ. – а 201100939; заявл 28.01.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. – 4 с.
39. Патент на винахід 98182 Україна, МПК В02С 19/06. Спосіб газоструминного подрібнення сипучого матеріалу / Прядко Н.С.; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАНУ і ДКАУ. – а 201008111; заявл 29.06.2010; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. – 3 с.
40. Патент на винахід № 104427 Україна, МПК В02С 25/00. Спосіб моніторингу струминного подрібнення і газоструминний млин / Пілов П.І., Горобець Л.Ж., Прядко Н.С.; заявник і патентоволодар Національний гірничий університет. – а 201016004; заявл. 31.12.2010; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. – 6 с.
41. Прядко Н.С. Влияние измельчения минерального сырья в нагретых струях на показатели его обогащения / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, В.В. Гаевой, И.А. Шуляк, Б.Ф. Бевзенко // VI конгресс обогатителей стран СНГ, март 2007 г., Москва : сб. материалов. – Москва, 2007. – С. 182 – 184.
42. Прядко Н.С. Мониторинг изменений технологических и режимных параметров в процессе струйного измельчения строительных материалов / П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко и др. // Применение дисперсных и ультрадисперсных порошковых систем в промышленных технологиях: научно-техническая конференция, июль 2008 г., Санкт-Петербург : сб. материалов. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 112 – 127.
43. Прядко Н.С. Развитие основ акустического мониторинга струйного измельчения минерального сырья / П.И. Пилов, В.Н. Бовенко, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко, И. А. Шуляк, Б. Ф. Бевзенко // Материалы VII конгресса обогатителей стран СНГ. – Москва, 2009 // www.minproc.ru.docs.2009.report. 2009.doc.

44. Прядко Н.С. Моделювання програмного комплексу для обробки результатів моніторингу процесу струминного подрібнення матеріалів / Т.М. Буланая, Н.С.Прядко, Засядько А.А., Петренко М.А // Збірник праць міжнародної проблемно – наукової міжгалузевої конференції «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління (ПНМК-2011), вип. 7. – 2011. – С. 331-335.
- 45.Прядко Н.С. Исследование рабочей зоны струйной мельницы на основе акустического мониторинга / Пилов П.И., Горобец Л.Ж., Прядко Н.С., Цыбулько Л.А.,Бевзенко Б.Ф., Гаевой В.В., Краснопер В.П. // Сб. материалов VIII Конгресса обогатителей стран СНГ, т.1.– МИСиС.– 2011.– С. 302-305.
- 46.Прядко Н.С. Михалев А.И. Анализ процесса тонкого измельчения материалов на основе Гильберта-Хуанга и вейвлет – преобразований акустических сигналов /А.И. Михалев, Н.С. Прядко, Р.А. Сухомлин// IX Конгресс обогатителей стран СНГ. Сборник материалов. Том 1.– М.: МИСиС, 2013.– С. 409 -412.
47. Прядко Н.С. Оптимизация тонкого измельчения при подготовке минерального сырья к обогащению и переработке/ Н.С. Прядко, Л.Ж. Горобец, К.А. Левченко, Л.А. Цыбулько, А.М. Шевелева // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. научн. тр. – Красноярск: Сиб. федер. ун–т. – 2013. –Вып. 11. – С. 232 – 241.
48. Прядко Н.С. Исследование процесса измельчения материалов акустическими методами с использованием преобразования Гильберта-Хуанга и вейвлет-анализа/ Пройдак Ю.С., Михалев А.И., Сухомлин Р.А., Бабенко Ю.В., Прядко Н.С., Дыя Х., Кавалек А.// XIV Международная научная конференция «Новые технологии и достижения в металлургии и инженерии материалов и процессов». Том 1. г. Ченстова, Польша, 2013. – С. 137-141.
49. Pryadko N.S. Decrease of Power Consumption in Fine Grinding of Minerals / G.G. Pivnyak, P.I. Pilov, N.S. Pryadko // Mine Planning and Equipment Selection.– Springer International Publishing.– Switzerland.– 2014. – P. 1069 – 1079.

Особистий внесок автора в роботи, опубліковані в співавторстві:

З робіт, які відображають основні результати дисертації й написані в співавторстві, автор взяв тільки ті результати, які належать йому особисто. У цих роботах авторіві належить наступне.

У статтях [2-3, 6-7, 11, 13, 15, 27, 32, 42-43, 46-47] – обґрунтування застосування методу акустичного моніторингу для процесу струминного подрібнення, розробка апаратної бази, розробка алгоритму й системи аналізу акустичних сигналів. В [5, 16, 19-20, 23, 35, 41, 45, 48] виявлення зв'язків технологічних і акустичних параметрів, обґрунтування застосування акустичних критеріїв для оптимізації роботи млина. У статтях [8, 14, 17, 24-26, 34, 44] – проведення й обробка експериментальних досліджень роботи млина. Постановка задач моделювання різних схем замкнутого циклу подрібнення, методика перевірки моделей у [9, 12]. У циклі статей [22, 31, 37] – розробка використання різних інформаційних технологій для ідентифікації струминного подрібнення. Теоретичне обґрунтування особливостей тонкого подрібнення [29-30, 36, 49]. Розробка способу, алгоритму регулювання подрібненням в [38, 40].

АНОТАЦІЯ

Прядко Наталія Сергіївна Розвиток теорії тонкого подрібнення корисних копалин.– На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.08 – «Збагачення корисних копалин».- ДВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України, м. Дніпропетровськ, 2015.

Дисертацію присвячено розробці теорії й технології подрібнення матеріалів на основі зв'язку технологічних і емісійних параметрів процесу. Виходячи з аналізу енергетичних особливостей тонкого подрібнення корисних копалин у барабанних і струминних млинах виявлено критичний рівень енергоємності тонкого подрібнення, проведено експериментальне обґрунтування незалежності подрібнення фракцій у суміші, розроблено балансову, імітаційну, динамічну, стохастичну моделі тонкого подрібнення для ідентифікації технологічних режимів подрібнення й підвищення ефективності процесу.

На основі теорії руйнування й особливостей застосування методу акустичної емісії для протитечійного струминного млина встановлено зв'язки технологічних і акустичних параметрів. Розроблено коміркову математичну модель процесу на основі ланцюгів Маркова на базі результатів акустичного моніторингу. Установлено акустичні параметри ефективності й критерій оптимальності роботи струминного млина. Показано можливість проведення оптимізації струминного подрібнення мінеральної сировини на основі результатів акустичного моніторингу процесу. Розроблено методи візуалізації й оптимізації подрібнення з використанням інформаційних технологій. Це дозволило досягти необхідних технологічних показників при зниженні енергоспоживання й дотриманні контрольної дисперсності.

Ключові слова: руйнування, тонке подрібнення, акустичні сигнали, моніторинг, енергоспоживання, оптимізація

АННОТАЦИЯ

Прядко Наталия Сергеевна Развитие теории тонкого измельчения полезных ископаемых.– На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.15.08 – «Обогащение полезных ископаемых».- ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск, 2015.

Диссертация посвящена разработке теории и технологии измельчения полезных ископаемых на основе связи технологических и эмиссионных параметров процесса. Исходя из анализа энергетических особенностей тонкого измельчения полезных ископаемых в барабанных и струйных мельницах выявлен критический уровень энергоёмкости тонкого измельчения, связанный с типом из-

мельчения и размерами частиц (порядка 10-25 мкм) готового продукта, и приближение к которому характеризуется значительным увеличением энергоемкости процесса измельчения и обозначает предельные возможности механического раскрытия полезных ископаемых и обогащения. Показаны пути контроля перехода величины энергоемкости через критическую величину на основе управления процессом тонкого измельчения с использованием математического моделирования и информационных технологий. Разработан научный подход к снижению удельных энергозатрат в замкнутых циклах тонкого измельчения, который включает разработку балансовой модели и выбор оптимального режима классификации по крупности загрузки мельницы. Установлена величина удельных энергозатрат по вновь образованному классу как характерная константа мельницы при измельчении данной руды. Доказана независимость кинетики измельчения фракций сыпучих материалов в смеси, которая позволяет прогнозировать изменение их в ходе измельчения, и на этой основе обосновывать технологические схемы и выбор измельчителей.

Создана имитационная модель замкнутого цикла измельчения, показавшая возможность повышения производительности мельницы при дискретной загрузке. Разработанная динамическая модель кинетики изменения гранулометрического состава материала в зоне измельчения позволяет определять длительность измельчения для получения заданного выхода контрольного класса и разработать систему управления гранулометрическим составом и производительностью мельницы по величине коэффициента переизмельчения.

На основе теории разрушения и особенностей применения метода акустической эмиссии для противоточной струйной мельницы установлены взаимосвязи технологических и акустических параметров, определены закономерности акустического излучения струйной установки: амплитуда акустических сигналов и ее распределение по величине характеризуют степень загрузки струй твердой фазой; избыточная загрузка струй материалом сопровождается уменьшением амплитуды акустического излучения; повышение уровня акустической активности зоны помола на любой стадии является фактором роста числа ударов частиц, интенсификации измельчения и увеличения производительности мельницы. Установлена трехпараметрическая зависимость величины максимальной амплитуды от размера частиц измельченного продукта и плотности материала, которая позволяет прогнозировать ожидаемый размер частиц готового продукта.

Система оптимизации работы струйной мельницы базируется на непрерывном мониторинге акустических параметров, использованных для прогнозирования энергоемкости диспергирования и измельчения. Оптимальные параметры процесса работы мельница реализованы путем контроля акустических параметров зоны измельчения и управления загрузкой материала на основе поиска оптимальной насыщенности струй твердой фазой.

Создана ячеечная модель процесса струйного измельчения, основанная на результатах акустического мониторинга и позволяющая идентифицировать режим измельчения. Система визуализации и идентификации режимов струйного измельчения, разработанная на основе информационных технологий и резуль-

татов акустического мониторинга, позволяет при минимальном количестве начальных экспериментальных данных выполнить выбор оптимальных параметров процесса струйного измельчения для разных материалов и технологических режимов.

Определены основные комплексные технолого-акустические критерии работы измельчительной установки: критерий оптимальности, эффективности измельчения и диспергирования, коэффициент циркуляции, позволяющие в значительной мере контролировать и оптимизировать измельчение в ходе его процесса. Разработан метод оценки энергозатрат при струйном измельчении, основу которого составляют связи технологических, акустических и энергетических показателей энергоемкости измельчения и диспергирования при разной дисперсности готового продукта.

Результаты теоретических исследований реализованы и подтверждены на промышленной и лабораторных струйных мельницах. Использование акустической оптимизации промышленной мельницы позволило достичь требуемых технологических показателей при снижении энергопотребления и соблюдении контрольной дисперсности.

Ключевые слова: разрушение, тонкое измельчение, акустические сигналы, мониторинг, энергопотребление, оптимизация.

THE SUMMARY

Pryadko Nataliya Sergeevna The theory development of mineral fine grinding. - Manuscript.

The thesis on acquirement of a scientific degree of Dr.Sci.Tech. on a specialty 05.15.08 - «Mineral processing». - State institution of high education «National mining university », Dnepropetrovsk, 2015.

The dissertation is devoted to the development of the theory and technology of mineral grinding on the connection basis of process technological and emission parameters. Proceeding from the power feature analysis of mineral thin grinding in drum-type and jet mills the critical level of thin grinding power consumption is revealed, the experimental substantiation of fractions grinding independence mixture is carried out, balance, imitating, dynamic, stochastic models of thin grinding for identification of technological grinding modes and increase of process efficiency are developed.

On the basis of the destruction theory and the application peculiar properties of an acoustic emission method for a counterflow jet mill the relations of technological and acoustic parameters are established. The mathematical cell model of process is developed on the basis of circuits Markov on the basis of acoustic monitoring results. Acoustic parameter of efficiency and an optimality criterion of jet mill operation are established. The opportunity of carrying out of mineral jet grinding optimization is shown on the basis of process acoustic monitoring results. Methods of grinding visualization and optimization with information technologies use are developed. It has al-

lowed achieving required technological parameters at power consumption decrease and dispersion control observance.

Key words: destruction, thin grinding, acoustic signals, monitoring, power consumption, optimization