



ПРЯДКО

Наталія Сергіївна —
доктор технічних наук, завідувач
відділу термогазодинаміки
енергетичних установок
Інституту технічної механіки
НАН України і ДКА України

РОЗВИТОК І ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТОНКОГО СТРУМИННОГО ПОДРІБНЕННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

**Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 24 червня 2026 року**

У доповіді представлено результати робіт, проведених в Інституті технічної механіки НАН України і ДКА України, з розроблення методів та підходів до підвищення ефективності тонкого струминного подрібнення сипких матеріалів у технологіях обробки корисних копалин. Розроблена методика дозволяє оптимізувати один з найбільш енергомістких процесів збагачення корисних копалин — тонке подрібнення, що веде до зниження собівартості і підвищення якості сировини.

Добрий день, шановні колеги!

Тонкодисперсні матеріали сьогодні широко використовують у різних галузях промисловості. Однак процеси тонкого подрібнення доволі енергомісткі, особливо в технологіях обробки корисних копалин. Тому визначення оптимальних умов подрібнення є актуальним завданням не лише з точки зору зменшення енергетичних витрат при отриманні тонкодисперсних порошків, насамперед порошків із твердих природних та синтетичних матеріалів, а й з огляду на жорсткі вимоги щодо чистоти й дисперсності матеріалів, які використовують у порошковій металургії, гідрометалургії, виробництві кераміки, емалей, фарб тощо.

Розглянемо детальніше особливості процесу тонкого подрібнення матеріалів. Зазвичай для його реалізації застосовують такі види млинів, як кульовий, планетарний або струминний. Для кожного з цих млинів є свої методи контролю та оптимізації процесу, однак жоден з них не дозволяє в разі необхідності оперативно прийняти рішення щодо змінення режиму або технологічних параметрів без зупинки процесу подрібнення. При цьому продовження подрібнення в неоптимальному режимі призводить до погіршення якості продукту і часто потребує повторного подрібнення, а отже, додаткових витрат енергії.

Проведені нами дослідження засвідчили, що в процесах механічного руйнування гірських порід енергоспоживання зрос-



Рис. 1. Експериментальні установки для дослідження технології струминного подрібнення: UCI-20 і UCI-0,2

тає зі збільшенням питомої поверхні продукту (тобто в зоні тонкого подрібнення) і що струминні млини потребують більших витрат енергії, ніж кульові чи планетарні. Вперше було показано наявність критичного рівня енергоспоживання, вище якого порушується лінійний характер залежності питомої поверхні від витрат енергії, тобто процес подрібнення стає збитковим. Звичайно, ефективність подрібнення залежить від властивостей матеріалу.

Отже, існує проблема, яка полягає у встановленні закономірностей та механізму формування гранулометричного складу продуктів подрібнення для досягнення необхідного рівня дисперсності за мінімального енергоспоживання. Для її вирішення ми спробували реалізувати ідею керування гранулометричним складом подрібнених продуктів на основі зв'язку технологічних показників та параметрів акустичного моніторингу й емісійних ефектів руйнування.

Спочатку ми визначили основні характеристики акустичної емісії за різних навантажень і різних розмірів частинок, а потім — за струминного подрібнення. Встановлено кореляційний зв'язок амплітуди акустичних сигналів із розміром частинок, що руйнуються при стисканні лабораторних зразків гірських порід та ударах частинок у процесі струминного подрібнення. Розроблено комплексний підхід до створення системи керування та оптимізації процесу подрібнення на основі акустичного моніторингу.

Метод акустичної емісії, або акустичний моніторинг, дає інформацію про всі стадії кінетичного процесу руйнування та очікувані ефекти подрібнення. Ключовими акустичними характеристиками у прогнозі ефектів подрібнення є питоме акустичне випромінювання, кінетика амплітуд та активності акустичної емісії на стадії позамежного деформування.

Зважаючи на відомий серед фахівців-збагачувачів принцип: «не подрібнюй нічого зайвого», останнім часом для тонкого подрібнення стали застосовувати схеми замкнутого циклу, в яких з помольної камери вилучають недоздрібнений матеріал і спрямовують його до класифікатора. Там матеріал поділяють на готовий продукт потрібної крупності та матеріал, крупніший за необхідний, який знову повертають у камеру для подальшого подрібнення.

Подрібнення матеріалу в струминному млині відбувається в розмольній камері, в яку подають матеріал у струменях стисненого повітря або перегрітої пари. Типові швидкості потоків енергоносія (повітря) у струминних млинах становлять 300—500 м/с, у парових млинах швидкість потоку вища. З бункера матеріал завантажують у змішувальний об'єм, де він надходить у потік, прискорюється в розгінних трубах до швидкості потоку і виноситься в помольну камеру, в якій відбувається зіткнення двофазних струменів і подрібнення матеріалу.

Особливості струминних млинів висувають певні вимоги до завантажуваного матеріалу. Для невеликих млинів середній розмір частинок має бути не більш як 2 мм, для середніх — 2,5—3,0 мм, для великих установок — до 5—10 мм.

Сучасні струминні млини крім розмольної камери мають інтегрований класифікатор частинок, який відбирає частинки потрібного помелу. Зазвичай класифікатор (обертовий ротор з лопатками, розташованими вздовж радіуса обертання) монтують над розмольною камерою. У класифікаторі повітря з подрібненим продуктом прискорюється, і матеріал бажаної дисперсності покидає млин. З підвищенням частоти обертання ротора класифікатора розмір частинок, що залишають млин, стає мен-

шим. Отже, тониною помелу струминного млина можна керувати, змінюючи швидкість обертання класифікатора.

Усі результати теоретичних розрахунків ми спочатку перевіряли на двох експериментальних струминних млинах продуктивністю 20 і 0,2 кг/год, які ми маємо в нашому Інституті (рис. 1).

Розроблено також апаратну базу акустичного моніторингу процесу подрібнення (рис. 2). Вимірювання рівня акустичної активності зони помелу проводили за допомогою акустичного датчика, з'єднаного з латунним хвилеводом, встановленим усередині помольної камери млина. Для контролю якості подрібненого продукту другий хвилевід і датчик встановлювали в зоні класифікації. Датчики через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з'єднували з комп'ютером, на якому й проводили аналіз сигналів.

За результатами подрібнення матеріалів з різними фізичними властивостями, за різних технологічних параметрів встановлено взаємозв'язки параметрів акустичних сигналів та дисперсності продукту і технологічних режимів подрібнення. У цих дослідженнях використовували матеріали, на які в тонкому і надтонкому стані подрібнення є попит на ринку, — циркон, рутит, дистен, кварцовий пісок різного походження (український, бразильський, іранський), шлаки з різних металургійних комбінатів, вугілля, глину, клінкер, крейду, навіть зерна і лущиння кави. Створено базу даних, яка містить інформацію про характеристики матеріалів, дисперсність та гранулометричний склад продуктів подрібнення, величини досліджуваних параметрів та показників. Крім наукових досліджень цю базу даних успішно використовують для роботи зі студентами й аспірантами Дніпровської політехніки.

Перевірку теоретичних висновків щодо застосування акустичного методу для моніторингу процесу подрібнення проводили на Вільногірському гірничо-металургійному комбінаті на струминному млині № 7, який задовольняє технологічні вимоги до отримання тонкодисперсних активованих порошків мінеральної сировини.

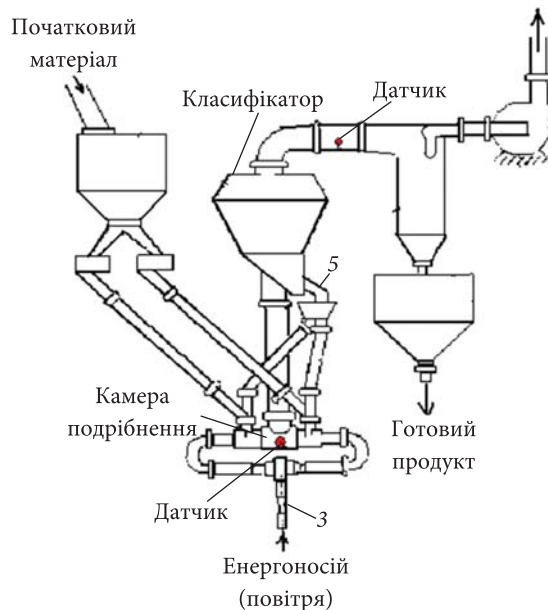


Рис. 2. Схема струминної подрібнювальної установки з датчиками акустичного моніторингу

Ми запропонували систему керування процесом подрібнення з метою підвищення продуктивності млина і, відповідно, зменшення його енергоспоживання з дотриманням при цьому всіх вимог до дисперсності продуктів подрібнення на основі контролю величини амплітуди сигналів зони подрібнення.

Режим подрібнення оцінювали за кількістю подрібненого продукту, розрахунковим значенням продуктивності млина та ступенем дисперсності продукту. Випробування показали, що продуктивність млина відхиляється від максимального рівня у разі як перевантаження, так і недовантаження струменів. Тому керування процесом подрібнення для досягнення оптимальної продуктивності за потрібної дисперсності полягає в контролі завантаження струменів матеріалом і підтриманні тим самим робочого режиму подрібнення.

Встановлено, що режим подрібнення ідентифікується за величиною амплітуд сигналів характерних частот, що записуються під час акустичного моніторингу зони подрібнення. Для цього було розроблено кілька інформаційних методів.

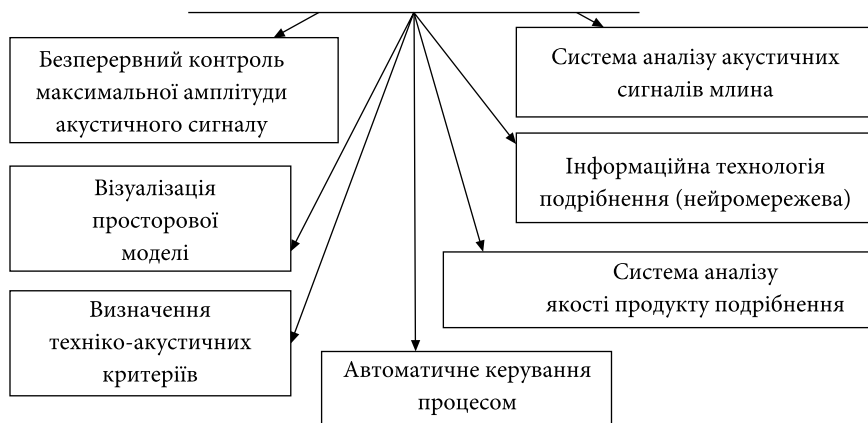


Рис. 3. Схема керування процесом подрібнення на основі акустичного моніторингу

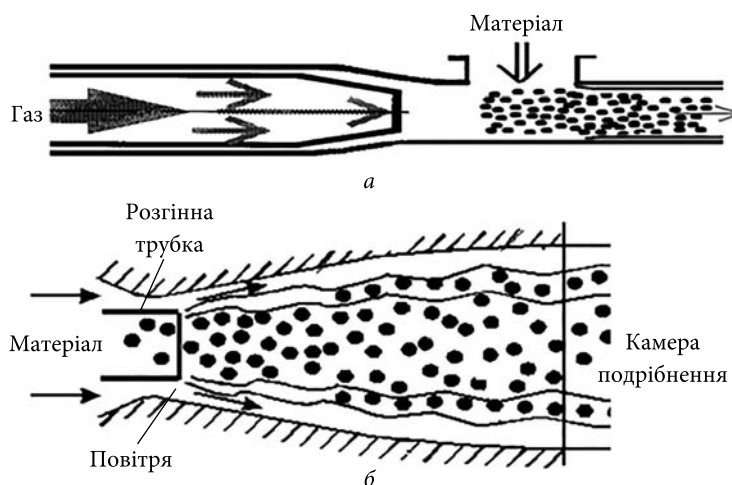


Рис. 4. Розробка Інституту, призначена для захисту від зносу газодинамічних трактів струминного млина: а — наявна схема; б — запропонована схема

Виявлені закономірності зміни величини амплітуди акустичних сигналів зони подрібнення за різних режимів процесу було уточнено завдяки додатковим дослідженням частот сигналів. Встановлено характерні частоти, амплітуди сигналів яких різняться за різних режимів подрібнення. За амплітудами сигналів з інформаційними частотами можна робити висновки про режим подрібнення та ступінь заповнення млина матеріалом.

На основі встановленого зв'язку закономірностей змінення технологічних параметрів процесу струминного подрібнення та амплітудно-частотних характеристик сигналів акустичного моніторингу закладено базу для оптимізації струминного подрібнення.

За результатами проведених робіт розроблено алгоритм та програму керування процесом

струминного подрібнення. На рис. 3 наведено схему керування процесом подрібнення на основі акустичного моніторингу.

Комплексна система керування процесом подрібнення охоплює чотири структурні зони: зону контролю сигналів у процесі подрібнення, зону керування завантаженням, зону аналізу отриманих сигналів та видачі рекомендацій щодо змінення технологічних чи режимних параметрів процесу та зону контролю якості продукту.

Застосування акустичного моніторингу параметрів для оптимізації процесу струминного подрібнення дає такі переваги:

- безперервний контроль процесу;
- змінення завантаження млина відбувається без зупинки технологічного процесу;
- рекомендації щодо керування процесом подрібнення видаються у режимі реального

часу з урахуванням взаємозв'язку акустичних і технологічних параметрів;

- за сигналами зони класифікації відбувається безперервний контроль якості (дисперсності) продукту. У разі потреби надаються рекомендації щодо змінення режиму.

Впровадження акустичного методу оцінки енерговитрат з використанням акустичних показників енергомісткості подрібнення та диспергування дає змогу зменшити питому величину технологічних енерговитрат у 2,0—2,5 раза.

Не залишилися поза увагою і газодинамічні аспекти роботи струминного млина. Проблема зносу газових трактів млинів завжди стояла досить гостро. На підприємствах доводиться щотижня замінювати розгінні трубки. У зв'язку з цим ми запропонували метод газодинамічного захисту каналів.

За результатами моделювання газових потоків у каналах подрібнювача розроблено пропозиції щодо вдосконалення системи подачі матеріалу і форми розгінних трубок млина. Дослідження двофазного потоку в ежекторі газоструминного млина показали, що підведення робочого тіла (повітря) по осі та периметру розгінної трубки, а також використання конфузornoї ділянки в кінці трубки та бічного підведення подрібнюваного матеріалу забезпечує вирівнювання вихрового потоку в трубі і створює вздовж неї стабільний пристінко-

вий шар, що захищає стінки трубки, зменшує знос її поверхні та підвищує надійність роботи (рис. 4). Ці конструктивні модифікації запатентовано та рекомендовано для використання в промислових умовах Вільногірського гірничо-металургійного комбінату.

Отже, на основі встановлених закономірностей тонкого подрібнення розроблено моделі процесу та запропоновано новий підхід до його аналізу й оптимізації на основі зв'язків технологічних параметрів та акустичних сигналів робочих зон, а також використання інформаційних технологій для ідентифікації процесу.

Розроблено алгоритм та реалізовано схему автоматичного керування процесом подрібнення за результатами його акустичного моніторингу.

Запропоновано схему модернізації конструкції для підвищення ефективності подрібнення і захисту елементів млина від зносу, спричиненого твердими частинками матеріалу.

Проведені роботи дозволили обґрунтувати й розробити методи вибору оптимальних технологічних параметрів процесу, внаслідок чого досягнуто необхідних технологічних показників за одночасного зниження енергоспоживання та дотримання контрольної дисперсності.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання
підготувала О.О. Мележик*

Nataliya S. Pryadko

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1656-1681>

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF FINE JET GRINDING TECHNOLOGY FOR BULK MATERIALS

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, June 24, 2026

The report presents the results of work carried out at the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine on the development of methods and approaches to increasing the efficiency of fine jet grinding of bulk materials in mineral processing technologies. The developed methodology allows optimizing one of the most energy-intensive processes of mineral enrichment — fine grinding, which leads to a decrease in cost and an increase in the quality of raw materials.

Cite this article: Pryadko N.S. Development and application of fine jet grinding technology for bulk materials (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, June 24, 2026). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (8): 63—67. <https://doi.org/10.15407/visn2026.08.063>