
Аналіз способів визначення гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина ультразвуковим методом та підвищення ефективності шляхом врахування зміни концентрації пульпи

Вадим Юрійович Харламенко

Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій, факультет інформаційних технологій, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна
ORCID 0000-0002-4008-5518

Віталій Сергійович Лазарєв

Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій, факультет інформаційних технологій, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна

Для цитування цієї статті:

Харламенко Вадим Юрійович, Лазарєв Віталій Сергійович. Аналіз способів підвищення ефективності визначення гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина ультразвуковим методом та підвищення її шляхом врахування зміни концентрації пульпи. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 3, No. 4, 2024, pp. 70-77. doi: 10.46299/j.isjea.20240304.07.

Надійшла до редакції: 10 червня 2024 р.; **Схвалено:** 17 липня 2024 р.;

Опубліковано: 01 серпня 2024 р.

Анотація: Подрібнення руди на гірничозбагачувальному комбінаті, що використовує кульові млини, є ключовим етапом у виробництві чорних металів. Цей процес характеризується високою ресурсоемністю та впливає на якість подальшої обробки. Впровадження сучасних інформаційних технологій для автоматизації прийняття рішень під час ремонту та управління дозволяє підвищити ефективність використання обладнання та знизити економічні витрати. Насьогодні існують методи ультразвукового дослідження гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина що описані в ряді наукових досліджень, але такі методи, незважаючи на свою перспективність, не знайшли широкого застосування через низку проблем, які необхідно виокремити для подальших досліджень. Одним із таких методів є метод визначення гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина. Ультразвуковий метод дослідження пульпи заснований на аналізі відбиття та розсіювання ультразвукових хвиль різної частоти при проходженні через суспензію. Цей метод дозволяє в реальному часі отримувати дані про розподіл розмірів часток, забезпечуючи точний і оперативний контроль процесу подрібнення. Серед переваг методу – висока чутливість до змін гранулометричного складу та можливість безперервного моніторингу. Впровадження ультразвукових систем для контролю пульпи сприяє оптимізації режимів роботи кульового млина, зниженню енергоспоживання та покращенню якості продукту. Однак існує низка проблем, які обмежують широке впровадження ультразвукового методу. Серед основних проблем – висока вартість обладнання та необхідність його регулярного калібрування. Крім того, точність вимірювань може бути знижена через наявність бульбашок повітря в пульпі, варіації у складі та концентрації твердої фази, а також через можливе забруднення датчиків. Інтерпретація отриманих даних потребує високої кваліфікації персоналу та спеціалізованого програмного забезпечення. Подальші дослідження спрямовані на вирішення цих технічних проблем, зниження вартості систем та інтеграцію з іншими автоматизованими системами управління виробничими процесами.

Ключові слова: гранулометричний склад; пульпа; ультразвук; збагачування; кульовий млин.

1. Вступ

Подрібнення руди на гірничозбагачувальному комбінаті, що використовує кульові млини, є ключовим етапом у виробництві чорних металів. Цей процес характеризується високою ресурсоемністю та впливає на якість подальшої обробки. Впровадження сучасних інформаційних технологій для автоматизації прийняття рішень під час ремонту та управління дозволяє підвищити ефективність використання обладнання та знизити економічні витрати. Існуючі методи підтримки прийняття рішень для регулювання подрібнюючого комплексу не забезпечують стабільного та оптимального режиму. Сучасні системи комп'ютерної підтримки прийняття рішень необхідні для оптимального управління процесами збагачення руд. Магнітозбагачувальна фабрика складається з кількох технологічних ліній, які включають подрібнення, класифікацію та магнітну сепарацію. Подрібнення руди здійснюється в кульових і безкульових млинах. Густина пульпи у млинах є одним з ключових чинників, що впливають на їхню продуктивність і розмір часток подрібненої руди. Згідно з [1] максимальна ефективність млинів досягається при підтримуванні густини пульпи на рівні 65–75% для крупної руди (≥ 13 мм) та 50–70% для дрібного матеріалу (4–6 мм).

Насьогодні існують методи ультразвукового дослідження гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина, що описані в ряді наукових досліджень, але такі методи, незважаючи на свою перспективність, не знайшли широкого застосування через низку проблем, які необхідно виокремити для подальших досліджень. Ультразвуковий метод дослідження пульпи заснований на аналізі відбиття та розсіювання ультразвукових хвиль різної частоти при проходженні через суспензію. Цей метод дозволяє в реальному часі отримувати дані про розподіл розмірів часток, забезпечуючи точний і оперативний контроль процесу подрібнення. Серед переваг методу – висока чутливість до змін гранулометричного складу та можливість безперервного моніторингу. Впровадження ультразвукових систем для контролю пульпи сприяє оптимізації режимів роботи кульового млина, зниженню енергоспоживання та покращенню якості продукту.

Однак існує низка проблем, які обмежують широке впровадження ультразвукового методу. Серед основних проблем – висока вартість обладнання та необхідність його регулярного калібрування. Крім того, точність вимірювань може бути знижена через наявність бульбашок повітря в пульпі, варіації у складі та концентрації твердої фази, а також через можливе забруднення датчиків. Інтерпретація отриманих даних потребує високої кваліфікації персоналу та спеціалізованого програмного забезпечення. Подальші дослідження спрямовані на вирішення цих технічних проблем, зниження вартості систем та інтеграцію з іншими автоматизованими системами управління виробничими процесами.

Таким чином, впровадження ультразвукових методів визначення гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина має значний потенціал для підвищення ефективності процесу подрібнення. Але для досягнення широкого застосування цієї технології необхідні додаткові дослідження та вдосконалення, що сприятиме подальшому розвитку гірничозбагачувальної галузі.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Процес подрібнення руди на гірничозбагачувальному комбінаті з використанням кульових млинів та ультразвуковий метод визначення гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина, включаючи технічні та економічні аспекти його впровадження,

проблеми точності вимірювань, вартість обладнання, необхідність калібрування та можливості інтеграції з автоматизованими системами управління виробничими процесами.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу подрібнення руди на гірничозбагачувальному комбінаті шляхом впровадження ультразвукового методу визначення гранулометричного складу пульпи. Завдання включають аналіз існуючих методів, оцінку технічних характеристик ультразвукового методу, виявлення та класифікацію проблем, розробку рекомендацій щодо вдосконалення, проведення експериментальних досліджень та оцінку економічної ефективності впроваджених удосконалень.

4. Аналіз літератури

Використання ультразвукових хвиль в процесах збагачення залізної руди описано в [2-7]. Такий підхід полягає в дослідженні вмісту залізної руди для миттевого та неінвазивного визначення вмісту корисних компонентів в пульпі.

Однією з головних переваг цього методу є його миттєвість та неінвазивність. Вимірювання відбувається в реальному часі без необхідності знищення чи модифікації зразка, що дозволяє зменшити час і витрати на аналіз. Також, ультразвукове дослідження може бути використане для автоматизації процесу вимірювання великої кількості зразків, що полегшує виробничий процес.

В основі цього методу лежить вимірювання зміни амплітуди ультразвукової хвилі пройденої через матеріал.

Згідно з [2, 3], амплітуда ультразвукової хвилі частоти V , що пройшла в середовищі відстань Z , описується залежністю

$$A_v(z) = A_0 \exp \left\{ - \frac{ZN}{V \int_0^{r_m} dr F(r) \sigma(v, r)} \right\}, \quad (1)$$

де N – число часточок в ефективному контрольованому об'ємі пульпи V ; A_0 – амплітуда об'ємної хвилі, пройденої ту саму відстань в чистій воді; r_m – максимальний розмір твердих часток; $\sigma(v, r)$ – перетин послаблення ультразвуку частоти v на твердій частці сферичної форми радіусу r та щільності ρ_T .

$$A = \frac{N}{v} \sum_{i=1}^m f(r_i) \Delta r_i \sigma(v, r_i) \sum_{i=1}^m -c_i a(v, r_i), \quad (2)$$

де $a(v, r_i) = \sigma(v, r_i)$; c_i – концентрація часток розміру в межах інтервалу Δr_i .

При формуванні сигналу на різних частотах $v_j (1 \leq j \leq m)$ отримаємо систему алгебраїчних рівнянь

$$A_j = \sum_{i=1}^n -c_i a_{ji}, \quad (3)$$

де $a_{ji} a(v, r_i) = \Delta r_i \sigma(v, r_i)$.

При цьому підбір частот залежить від діаметру часток. Згідно з [2], максимальна довжина хвилі має відповідати максимальному радіусу часток і навпаки.

На підбір частоти ультразвукової хвилі значний вплив має явище кавітації. Газові бульбашки що утворюються в пульпі під час проходження ультразвукової хвилі вносять значну похибку в результат вимірювань. В [3] зазначено що кавітація виникає через високу чутливість рідин до розтягуючих сил. Потужні ультразвукові коливання призводять до появи зон стиснення та розрідження в рідині. Розрідження призводить до утворення кавітаційних бульбашок, які різко захлопуються під час фази стиснення. У цей момент тиск газу в парогазовій суміші досягає 3000 атмосфер, а температура піднімається до 6000К. Газ, стискаючись у мікропорожнинах, швидко розширюється, створюючи ударну хвилю, схожу на точковий вибух. На поверхні кавітаційних бульбашок виникають електричні заряди, а всередині бульбашок відбуваються електричні пробої, які є причиною процесу іонізації парів та газів. Оптимальний режим диспергування визначається інтенсивністю ультразвукової хвилі та тривалістю процесу. Насичення пульпи кавітаційними бульбашками підвищує її хвильовий опір, що збільшує витрату акустичної енергії та активні втрати. Парогазові бульбашки поглинають ультразвукову енергію і екранують тверді частинки від її впливу.

В [4, 7] описано використання об'ємних ультразвукових хвиль двох різних частот. В основі цього методу лежить вимірювання згасання хвилі Лемба. Такий підхід пояснюється особливостями технологічного процесу збагачення, а саме магнітну флокуляцію – процес утворення флокул з намагнічених часток. При цьому відбувається зміна концентрації часток контрольного класу крупності у вимірюваному середовищі. На рис. 1 зображено схему каналу вимірювання, яку запропоновано у [4].

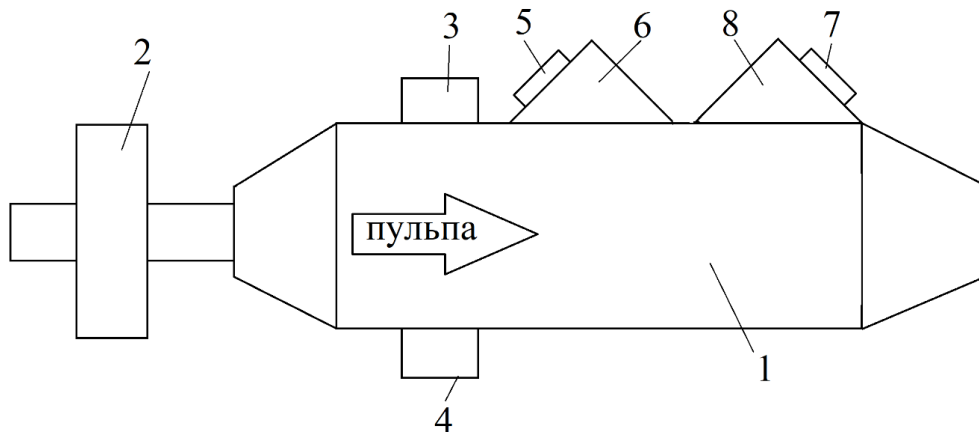


Рис. 1. Схема каналу вимірювання.

Через вимірювальний канал 1 переміщується пульпа що попередньо намагнічена котушкою 2. Одна із стінок каналу є вимірювальною пластинною, по якій розповсюджуються хвилі Лемба що формуються призмою 6 та випромінюючого п'єзо-перетворювача 5. Пройшовши деяку фіксовану відстань по пластині, хвиля потрапляє в прийомний п'єзо-перетворювач 7 через формуючу призму 8. Випромінювач 3 п'єзо-електричного типу генерує ультразвукові хвилі, що після проходження через вимірювану середу потрапляють до прийомного перетворювача 4.

В цьому випадку визначення твердих часток в пульпі відбувається завдяки аналізу амплітуди повздовжніх та поперечних хвиль. Такі хвилі називаються об'ємними. Проте, як зазначено в [2], при практичній апробації цього методу з'ясувалось, що в реальних умовах, через особливості технологічного процесу, в пульпі немає можливості визначити ділянку діапазону, в якому буде відсутня складова повного коефіцієнту затухання, що значно знижує точність такого способу визначення якісного складу пульпи. Також виникають труднощі через неможливість контролю рівня газоутворення та кавітації в пульпі.

В [5] запропонований спосіб ультразвукового дослідження що полягає у використанні одного каналу вимірювання налаштованого на певну частоту. В такому випадку необхідним є наявність додаткового каналу вимірювання розсіяних хвиль. Спосіб полягає у передаванні ультразвукових променів у пульпу, виявлення ослабленого та розсіяного випромінювання, створення відповідних сигналів, визначення коефіцієнтів розсіювального і загального загасання і розрахунок середнього розміру часток шляхом порівняння цих коефіцієнтів. Аналізатор розміру часток складається з ультразвукових передавачів і датчиків, що приймають та аналізують ультразвукове випромінювання для точного визначення розміру часток незалежно від густини пульпи.

При такому підході велике значення має підбір частоти, оскільки занадто низька частота не дасть інформацію про розмір часток а також не призведе до необхідного рівня розсіювання хвиль через в'язкість середовища. Занадто висока частота (5-8 МГц), як зазначено в [4], в свою чергу, призводить до зниження точності через кавітацію, що було згадано вище.

В роботі [8] було запропоновано об'єднати блок дослідження гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина з блоком контролю за щільністю живлення класифікатора. Це дасть змогу збирати та аналізувати дані про кількість води, яка подається в класифікатор, а отже дозволить збільшити точність виміру щільності пульпи.

Проте ультразвукові хвилі можуть використовуватись також безпосередньо в процесі збагачення. Таке використання ультразвукового випромінювання описується в роботах [9, 10, 13].

Покращення якості магнетитових концентратів можливе завдяки очищенню поверхні мінералів від шламових часток та техногенних зростків. Це сприяє дезінтеграції рудних флокулоутворень і підвищенню виходу високоякісного концентрату. В [9, 11] зазначається що оптимальна кількість п'єзоелементів в фазовій решітці – 16 штук. Така кількість необхідна для кращого спрямування ультразвукової хвилі та зменшенню бічних пелюсток діаграми спрямованості.

При цьому оптимальний час обробки пульпи ультразвуком, як зазначено в [10], лежить в межах 60-120 секунд з інтенсивністю 1,2-1,9 Вт/см², що дозволяє підвищити вихід продукту.

5. Методи досліджень

Методика дослідження включала аналіз наукових праць, присвячених ультразвуковим методам визначення гранулометричного складу пульпи, що дозволило систематизувати існуючі знання та ідентифікувати ключові проблеми та досягнення в цій галузі. Методологія дослідження передбачала порівняння запропонованих методів та їх технічних характеристик, що дало змогу обґрунтовано підійти до розробки нової формули. На основі аналізу та узагальнення існуючих формул була запропонована нова математична модель, адаптована до специфіки досліджуваного процесу.

6. Результати досліджень

Спираючись на дослідження [2, 4, 12, 14] можна розробити спосіб дослідження гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина, який буде поєднувати в собі функцію вимірювання та попередньої обробки пульпи ультразвуковими хвилями.

В дослідженні [9] представлена формула, що враховує зміну концентрації часток радіусу r

$$\frac{\partial n_r(Z, t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial Z} [V_r(Z, t)n_r(Z, t)], \quad (4)$$

де $n_r(Z, t)$ – концентрація часток радіуса r ; $V_r(Z, t)$ – швидкість зсуву частки радіуса r з координатою Z в ультразвуковому полі.

Також це рівняння представлено в експоненційній формі

$$n_r(Z, t) = n_0 \frac{e^{\alpha z}}{e^{\alpha z} - \alpha \beta t} St(e^{\alpha z} - 1 \alpha \beta t), \quad (5)$$

де

$$\beta = \frac{2r(kr)^4}{27\eta c} l_0 \left(a_1^2 + a_1 a_2 + \frac{3}{4} a_2^2 \right); \quad (6)$$

$$a_1 = 1 - \frac{rc_T^2}{\rho c^2}; \quad (7)$$

$$a_2 = 2 \frac{p_T - p}{2p_T + p}, \quad (8)$$

де p_T, c – щільність частки і швидкість звуку в матеріалі частки; p, c – щільність досліджуваного середовища і швидкість ультразвуку в ній.

Підставимо рівняння (5) в рівняння для визначення величини формування сигналу та отримаємо рівняння, що враховує зміну концентрації твердих часток в пульпі при впливі на пульпу ультразвуку частоти V_j

$$A = \left(\frac{N}{V} \right) \int_0^r \frac{\partial}{\partial Z} [V_r(Z, t) n_r(V_j, t)]. \quad (9)$$

При цьому V_j має лежати в межах $1 \leq V_j \leq 8$ МГц, виходячи з умов кавітації в пульпі. Час протягом якого пульпа піддається впливу ультразвуку, а отже і час заміру величини хвилі t складає 60-120 секунд, що є достатнім для ефективної попередньої обробки пульпи та для заміру величини хвилі A .

При вимірюванні величини хвилі по двом каналам, підставивши (7) та (8) в рівняння визначення величини згасання хвилі отримаємо.

$$A_j = \sum_j \left(2 \frac{p_T - p}{2p_T + p} \left(1 - \frac{rc_T^2}{\rho c^2} \right) \right). \quad (10)$$

При цьому такий підхід не потребує конструктивних змін при реалізації методу запропонованому в [4].

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Перспективи подальшого розвитку ультразвукового дослідження гранулометричного складу пульпи полягають у вдосконаленні методу через урахування зміни концентрації пульпи, спричиненої попередньою обробкою ультразвуковими хвилями. Це відкриває шлях до обмеження необхідності використання високих частот, що можуть спричинити кавітацію та зниження точності досліджень. Однією з ключових проблем попередніх досліджень було нелінійне розподілення часток у пульпі та виникнення кавітації, які ускладнювали вибір оптимальної частоти для вимірювань. Застосування отриманих рівнянь може підвищити

ефективність методу, забезпечуючи більш точний контроль за процесами подрібнення руди та інших матеріалів.

8. Висновки

Таким чином, отримані рівняння дозволяють виконати ультразвукове дослідження гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина з урахуванням зміни концентрації пульпи, що виникає внаслідок попередньої обробки пульпи ультразвуковими хвилями. Врахування цього параметра дозволяє обмежити пошук ефективної частоти дослідження та уникнути використання більших частот, що призводять до виникнення кавітації та суттєвого зменшення точності вимірювань. З робіт [9, 12, 15] випливають недоліки методу ультразвукового дослідження гранулометричного складу пульпи, пов'язані з нелінійним розподілом часток різної крупності у пульпі, а також кавітацією, яка обмежує підбір частот для ефективного визначення складу. Отримані рівняння допоможуть підвищити ефективність такого методу завдяки врахуванню зміни концентрації часток у пульпі в досліджуваній ділянці, що сприятиме точнішому та надійнішому контролю за процесами подрібнення руди.

Список літератури:

- 1) Папушин, Ю. Л., Смирнов, В. О., & Білецький, В. С. (2006). Дослідження корисних копалин на збагачуваність. Донецьк: "Східний видавничий дім". – С. 138-139.
- 2) Моркун, В. С., Дворников, В. А., & Касаткина, И. В. (2016). Анализ методов определения гранулометрического состава твердой фазы пульпы с использованием объемных ультразвуковых волн. Вісник Криворізького національного університету, 41, 49-54.
- 3) Губин, Г. Г., Ярош, Т. П., & Скляр, Л. В. (2016). Обобщение и анализ возможности использования ультразвуковых колебаний при переработке полезных ископаемых. Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб., 62(103), 132-143.
- 4) Поркуян, О. В., & Сотникова, Т. Г. (2010). Ультразвуковой метод контроля гранулометрического состава железорудной пульпы. Вост.-Европ. журн. передовых технологий, 4(4), 66-69.
- 5) Кондратец, В. О., & Мацуй, А. М. (2017). Динамічна корекція розрідження пульпи та завантаження кульового млина при зміні крупності руди. Вісник Криворізького національного університету, 45, 189-195.
- 6) Поркуян, О. В., & Сотникова, Т. Г. (2010). Комбинированный метод определения относительного содержания магнетита в твердой фазе железорудной пульпы. Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ": сб. науч. тр. Темат. вып.: Электроэнергетика и преобразовательная техника, 12, 29-36.
- 7) Тимошенко, М. А. (2016). Аналіз сучасних методів автоматизованого керування процесами збагачення залізної руди. Систем. технології, 5, 102-113.
- 8) Швець, Д. В. (2014). Розробка системи стабілізації масової долі заліза магнітного у зливні класифікатора та дослідження можливості автоматизації процесу подрібнення залізної руди та підготовки її до збагачення. Якість мінеральної сировини, 252-264.
- 9) Губін, Г. В., Моркун, В. С., Олійник, Т. А., Тронь, В. В., & Равінська, В. О. (2018). Моделювання впливу ультразвукового сигналу в середовищі для розробки нової технології рудо підготовки залізородної сировини. Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб., 69(110), 95-109.
- 10) Губін, Г. В., Моркун, В. С., Олійник, Т. А., Тронь, В. В., & Равінська, В. О. (2018). Підвищення якості товарної продукції за рахунок використання високоенергетичного ультразвуку. Вісник Криворізького національного університету, 46, 169-174.

11) Кондратець, В. О., & Мацуй, А. М. (2017). Динамічна корекція розрідження пульпи та завантаження кульового млина при зміні крупності руди. Вісн. Криворізь. нац. ун-ту: зб. наук. пр., 45, 189-195.

12) Morkun, V. Optimization of high-energy ultrasound source parameters for cavitation disintegration of ore floccules before floatation [Text] / V. Morkun, V. Tron, V. Ravinskaia // IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering. – 2017. – P. 96-99.

13) Моркун В.С., Поркуян О.В. Ультразвуковые поверхностные волны Лэмба и Лява в измерительных системах. – Кривой Рог: Изд. центр КТУ, 2006.- 261 с.

14) Хавский Н.Н., Смирнов Ю.Р., Бершицкий А.Н. Современное состояние использования ультразвука в процессах обогащения и гидрометаллургии цветных металлов. – М.: Цветметинформация, 1971.

15) Келлер О.К., Картыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. – Л.: Машиностроение, 1977. – 184 с.

Analysis of methods for determining the granulometric composition of slurry at the output of a ball mill using ultrasonic methods and enhancing efficiency by considering changes in slurry concentration

Vadym Kharlamenko

Department of Automation, Computer Science, and Technology/ Faculty of Information Technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine
ORCID 0000-0002-4008-5518

Vitalii Lazariev

Department of Automation, Computer Science, and Technology/ Faculty of Information Technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

Abstract: Ore grinding at a mining beneficiation plant, using ball mills, is a crucial stage in the production of ferrous metals. This process is resource-intensive and influences the quality of further processing. Implementing modern information technologies for decision-making automation during repairs and management helps enhance equipment utilization efficiency and reduce economic costs. Currently, there exist ultrasonic methods for investigating the granulometric composition of slurry at the output of a ball mill, as described in several scientific studies. However, despite their promise, these methods have not seen widespread use due to a number of issues that need to be addressed for further research. One such method is determining the granulometric composition of slurry at the output of a ball mill. The ultrasonic method of slurry investigation is based on analyzing the reflection and scattering of ultrasonic waves of different frequencies as they pass through the suspension. This method enables real-time data acquisition on particle size distribution, providing precise and timely control over the grinding process. Among the advantages of the method are high sensitivity to changes in granulometric composition and the ability for continuous monitoring. Implementing ultrasonic systems for slurry control facilitates optimization of ball mill operation modes, reduces energy consumption, and improves product quality. However, there are several issues limiting the widespread adoption of the ultrasonic method. Key issues include the high cost of equipment and the need for regular calibration. Additionally, measurement accuracy may be compromised by the presence of air bubbles in the slurry, variations in composition and concentration of the solid phase, and potential sensor contamination. Interpreting the obtained data requires highly skilled personnel and specialized software. Further research aims to address these technical issues, reduce system costs, and integrate with other automated process control systems.

Keywords: granulometric composition; slurry; ultrasound; beneficiation; ball mill.
