

## Використання високоенергетичного ультразвуку для підвищення якості очищення часток залізорудної сировини у процесі її збагачення

**В. С. Моркун, Г. В. Губін, Т. А. Олійник, В. В. Лотоус, В. О. Равінська, В. В. Тронь, Н. В. Моркун, М. О. Олійник**

*Погіршення якості концентратів в основному відбувається внаслідок утворення мікронних техногенних зростків. Запропоновано використання високоенергетичного ультразвуку в кавітаційному режимі для очищення поверхонь мінералів. Доведено, що ефективність ультразвукової обробки пов'язана з оновленням поверхонь часток, що призводить до збільшення контрастності магнітних і флотаційних властивостей мінералів. Виконано розрахунок пристрою формування високоенергетичного ультразвуку*

*Ключові слова: ультразвуковий вплив, очищення мінералів, залізна руда, кавітаційний режим, техногенні зростки*

### 1. Вступ

Залізна руда – основна сировина для металургійної промисловості світу. Ринок залізної руди в значній мірі впливає на економіку різних країн. Відомо, що на сьогоднішній день в 98 країнах світу виявлені родовища залізної руди різної якості. За оцінками експертів світові запаси залізної руди можуть становити близько 790 мільярдів тон. На сьогоднішній день загальні запаси залізних руд в світі прирівнюються до 464 мільярдів тон, з них підтвердженими на даний момент є близько 200 мільярдів тон [1, 2]. Україна займає одне з провідних місць у світі по запасам залізних руд та має потужну гірничорудну галузь. На території України розвідано значні запаси залізних руд, загальний обсяг яких перевищує 32 млрд т. Основний обсяг руд зосереджено у 52 родовищах. Видобуток на сьогодні ведеться у 25 родовищах: 21 – у Криворізькому басейні, 3 – у Кременчуцькому, 1 – у Білозерському.

Загальний обсяг видобутої товарної залізної руди перевищує 1 млрд т в рік, причому 55–58 % сировини використовується для виплавки металу. Сьогодні залізорудна продукція виробляється в 50 країнах світу, при цьому понад 85 % випуску товарної продукції доводиться на 8 країн (Бразилія, Австралія, Китай, США, Індія, Канада, Венесуела, Японія). За виробництвом товарних залізних руд (4,9 % світових) Україна займає 7-е місце в світі, поступаючись лише Китаю, Бразилії, Австралії, Індії, Російській Федерації та США [2].

Здебільшого світові запаси становлять залізні руди низькі і середні за якістю. У частковому відношенні на них припадає понад 87 відсотків від загального розвіданого запасу в світі. Такі руди містять в собі заліза від 16 до 40 відсотків і вимагають збагачення. Не є винятком і Україна.

Залізорудна магнетитова сировина, що видобувається в Україні, характеризується складною текстурою, структурою, підвищеним вмістом шкідливих

домішок, таких як діоксид кремнію, оксиди калію, натрію, магнію і сірки. При цьому вимоги до якості залізородних концентратів, що надходять на подальшу металургійну переробку, зростають, оскільки висока якість магнетитових концентратів дозволяє значно скоротити витрати в металургійному виробництві. Магнетитові концентрати, що на світовому ринку користуються попитом, мають масову частку заліза 69–70 %, діоксиду кремнію 2,5–3 %, сірки 0,06–0,08 % та інших шкідливих домішок не більше 0,3 % [3–5]. Концентрація сировини на світовому ринку вимагає негайних заходів щодо покращення якості залізородних концентратів і одночасного зниження їх собівартості на українських гірничо-збагачувальних комбінатах. Зберегти своє місце на світовому ринку залізородні гірничо-збагачувальні комбінати України можуть, лише вдосконаливши виробництво концентрату, який повинен містити 69–70 % заліза, не більше 2,5 % кремнезему, не більше 0,16 %  $K_2O+Na_2O$ .

Стандартні рішення в сучасних умовах не дозволяють досягти високих техніко-економічних показників виробництва. Отже, для переходу на новий технологічний рівень виробництва, що забезпечує якісні показники залізородної сировини світового рівня, необхідні нові підходи.

Відповідно, необхідність глибокого збагачення залізородної сировини, інтенсифікації та підвищення ефективності його переробки не викликає сумнівів. Отже, актуальним завданням є створення нових і вдосконалення існуючих технологій отримання залізородних концентратів високої якості при зниженні втрат заліза з відходами збагачення.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Руди різних типів відрізняються мінеральним складом і текстурно-структурними особливостями, що зумовлює необхідність застосування різних технологій збагачення. У зв'язку з цим, глибина збагачення і технологічні показники при переробці руди кожного конкретного типу визначаються низкою її характеристик. До таких характеристик відносять: речовинний склад, характер вкраплень компонентів, контрастність властивостей і ефективність сепараційних процесів. Технологія збагачення магнетитових руд однотипна та передбачає поетапну сепарацію з послідовним виведенням нерудної частини у хвості. Це є відмінною рисою технології переробки магнетитових руд, оскільки при збагаченні більшості корисних копалин переслідуються мета послідовного видалення рудних мінералів в готові продукти в міру розкриття.

За кордоном удосконалення технології збагачення залізних руд здійснюється шляхом комбінування технологічних схем. Чорновий концентрат отримують за схемами з магнітною сепарацією і потім для доведення використовують спеціальні методи збагачення. Серед таких методів можна виділити: промивання, відсадження, збагачення на концентраційних столах, гвинтових сепараторах і у важких суспензіях, магнітне збагачення, флотацію і флотогравітацію [6, 7].

Отримання високосортних концентратів на ГЗК України із застосуванням існуючого магнітно-збагачувального обладнання і технології представляє певні труднощі [7].

Основні причини цього полягають у наступному:

- низька ефективність сепарації через переподрібнення матеріалу і підвищеної його флокулюємості;
- недостатнє розкриття мінералів з утворенням «важких» зростків;
- засмічення концентратів за рахунок порушень технологічного режиму (загрублення подрібнення, порушення роботи сепараторів та ін.) і т. д.
- переважання окремих типів зрощень мінералів, що несприятливі для розкриття – пойкилітові та мірмекітоподібні зрощення, які різко знижують якість магнетитового концентрату при збагаченні кварцитів;
- присутність у складі концентрату часток, розмір яких перевищує стандартний;
- налипання на частинках магнетиту, які направляються в складі пульпи на магнітну сепарацію, наночасток нерудних мінералів;
- флокуляція часток магнетиту в полі магнітного сепаратора. При цьому до складу флокул входять частинки нерудних мінералів.

Важливе значення в зниженні якості концентратів має його переподрібнення, яке призводить до шламоутворення. Це пов'язано з низькою ефективністю подрібнення і класифікації. Так, якщо на I стадії класифікації у спіральних класифікаторах ефективність становить 50–60 %, то на II стадії у гідроциклонах діаметром 500–700 мм ефективність знижується до 30–38 %. А на III стадії у гідроциклонах діаметром 360–500 мм ефективність знижується до 25–30 %. Тобто 70–75 % вже розкритого матеріалу знову прямує з пісками гідроциклону на останню стадію подрібнення. Тому на окремих комбінатах, в якості доводочної операції використовується тонке грохочення (наприклад, Костомукшский ГЗК), що дозволяє підвищити масову частку заліза з 65,7 до 67,6 %. Для цих цілей в основному застосовується грохит тонкого просіювання фірми «Деррік» (США) [8, 9]. З метою підвищення якості концентрату на трьох ГЗК Кривбасу («АрселорМіталл Кривий Ріг», ПРАТ «Північний ГЗК», ПАТ «Південний ГЗК»), а також на ПРАТ «Полтавський ГЗК» у період 2003–2015 роки були проведені дослідження з доцільності застосування тонкого грохочення для підвищення якості магнетитового концентрату. При проведенні експериментів використовувалися грохоти Стак Сайзер (фірми «Деррік»). Дослідження показали, що методом тонкого грохочення з рядового концентрату (масова частка заліза загального у концентраті на рівні 64,5–65,5 %) можна отримати високоякісний концентрат із загальним вмістом заліза більше 67 %. Необхідно відзначити, що практика тонкого грохочення так само, як і флотаційне доведення залізородних концентратів до високої якості, використовується на збагачувальних фабриках США і Канади багато десятиліть.

В Україні сьогодні магнетитові кварцити переробляються з доопрацюванням концентратів флотацією на ПРАТ «Полтавській ГЗК» і «Інгулецький ГЗК». Флотаційне доведення концентратів є найбільш досконалим рішенням проблеми видалення кремнезему і отримання чистих магнетитових концентратів, навіть до мономінеральних фракцій [10]. Попутно зменшується вміст лугів калію і натрію, що входять до складу мінералів породи. Приріст вмісту заліза при флотаційному доведенні чорнових магнітних концентратів коливається на фабри-

ках від 2 до 9 %. В результаті зворотньої флотації можна отримати «суперконцентрати», які містять більше 70 % заліза загального та менше 2 % кремнезему. Вилучення заліза у концентрати залежить від вмісту магнетиту в рудах (18–35 %) і змінюється від 65 до 85 %. Якість флотаційних залізних концентратів залежить від мінерального складу руд.

Аналіз робіт [3–6, 10–11] дозволив встановити основну причину забруднення концентратів. Її сутність полягає у погіршенні контрастності технологічних властивостей мінералів, що відбувається за рахунок магнітної флокуляції часток і утворення мікронних техногенних зростків. Механізм появи техногенних зростків пов'язаний в основному з наявністю на поверхні часток іонно-електричних і молекулярних полів. Найбільш простим, на перший погляд, вважається застосування механічної відтирки поверхонь мінеральних часток, однак це не завжди призводить до очікуваних результатів [11]. Утворення техногенних зростків нівелює різницю у властивостях поверхні рудних і нерудних зерен, змінює їх магнітну сприйнятливість, і, отже, ефективність різних сепараційних методів.

У ДВНЗ «Криворізький національний університет» вивчалися промпродукти збагачення ПАТ «ЦГЗК» і ПАТ «Північний ГЗК» [11]. Зразки піддавали інтенсивному ультразвуковому впливу (УЗВ). Отримані результати дозволили зробити висновок про те, що в різних класах продуктів магнітного збагачення змінювалася масова частка заліза загального після УЗВ. У класах крупності, в яких концентрувалися розкриті зерна мінералів ( $-0,071$  мм), масова частка  $Fe_{\text{заг}}$  підвищувалася на 2,7–4,1 %. Водночас у шламових продуктах ( $-0,02$  мм) – знижувалася на 14,7 і 7,2 % для магнітних продуктів I і V стадій збагачення відповідно. Це свідчить про превалювання очищення часток від шламових покриттів над звільненням нерудних мінералів з магнітних флокул. Видалення мікронних техногенних утворень відбувається як з часток оксидів заліза, так і з часток кварцу і силікатів, результатом чого є оновлення поверхні часток і збільшення контрастності технологічних властивостей при магнітній сепарації і флотації.

Дослідження процесів очищення поверхні окисненого піриту у процесі флотації здійснено у праці [12]. Проведені експерименти показали, що очищення поверхні піриту з різним ступенем окислення досягається ультразвуковим впливом інтенсивністю  $\geq 0,3$  Вт/см<sup>2</sup> протягом 40 с. Відзначено, що ефективність ультразвукового впливу головним чином залежить від тривалості обробки матеріалу. І у меншому ступені ефективність залежить від величини інтенсивності ультразвукового впливу. Крім того, ультразвук сприяв утворенню бульбашок, що також підвищувало ефективність флотації.

Метод ультразвукового очищення вугілля із високим вмістом сірки у воді та змішаних лугах представлено у праці [13]. У результаті дослідження встановлено, що вплив ультразвукових коливань із частотою 20 кГц забезпечив максимальне видалення золи, піритної сірки, сульфатної сірки та загальної сірки відповідно 87,52, 83,92, 12,50 та 18,80 %.

Вплив ультразвукової кавітації на очищення часток у рідинах досліджено у праці [14]. Зазначено, що ультразвукова кавітація у рідкому середовищі викликає низку фізичних і хімічних ефектів. Коливання та колапс кавітаційних буль-

башок, що рухаються при низьких частотах ультразвуку (20 кГц), можуть генерувати сильні зсувні сили, мікроструми та ударні хвилі. Вказано, що названі ефекти можуть бути використані для впливу на поверхневу активність твердих часток у рідині.

У праці [15] зазначено, що потужний ультразвук може бути використано при збагаченні вугілля для вилучення з вугілля сірки. Зазначено, що основними ефектами ультразвуку у рідкому середовищі є акустична кавітація та акустичні струми. Встановлено, що застосування ультразвукового впливу дозволяє досягти кращого очищення порівняно із хімічними методами.

Проведені у праці [16] дослідження закономірностей кавітаційних процесів у пульпі дозволили сформувавши метод визначення оптимальних параметрів ультразвукових коливань для підтримання режиму кавітації. Запропонована аналітична залежність дозволяє розрахувати значення оптимальної частоти з урахуванням певного розміру газових бульбашок у пульпі.

Отже, збільшення якості магнетитових концентратів можливо за рахунок видалення з поверхні мінералів налиплих шламових часток та руйнування, так званих, техногенних зростків. Аналіз основних напрямів і підходів до цього питання показав, що застосування високоенергетичного ультразвуку певної інтенсивності для попередньої обробки залізорудної пульпи перед флотацією дозволить сформувавши чисту поверхню мінеральних часток. Тим самим, внаслідок дезінтеграції рудних флокулоутворень, вихід високоякісного концентрату збільшиться. Тому удосконалення технології флотаційного доведення магнетитових концентратів пропонується за рахунок використання імпульсного магнітного поля спадної напруженості та високоенергетичного ультразвуку в кавітаційному режимі.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою роботи є підвищення якості очищення часток залізорудної сировини у процесі її збагачення з використанням високоенергетичного ультразвуку для підвищення ефективності технології флотаційного доведення магнетитових концентратів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі задачі дослідження:

– виконати моделювання, дослідити вплив динамічних ефектів ультразвукових коливань на рудну пульпу у процесі збагачення і визначити оптимальні параметри джерела ультразвукових коливань для забезпечення заданої інтенсивності та спрямованості;

– дослідити можливість застосування попередньої обробки залізорудної пульпи за допомогою високоенергетичного ультразвуку для підвищення ефективності очищення;

– визначити оптимальні значення інтенсивності і тривалості ультразвукової обробки при очищенні мінеральних часток;

– дослідити ефективність ультразвукового впливу на зниження масової частки нерудних оксидів в очищених продуктах проб флотаційного доведення.

#### **4. Матеріали та методи досліджень ультразвукового впливу на показники магнітно-флотаційного збагачення**

##### **4. 1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті**

При виконанні роботи використано комплекс методів досліджень, що включає: узагальнення наукової інформації; рентгенофазовий і мінеральний аналізи руди і продуктів збагачення; дослідження способів формування високоенергетичного ультразвуку. Також було виконано моделювання і аналіз ефектів високоенергетичного ультразвуку; технологічні випробування в лабораторних умовах; синтез аналітичних закономірностей і обґрунтування раціональних параметрів процесу флотаційного доведення магнетитових концентратів. Експериментальні дослідження проведено з використанням спеціально розробленого лабораторного комплексу. До складу комплексу увійшло таке обладнання: ультразвуковий диспергатор з регульованою інтенсивністю УЗДН-А потужністю 130 Вт, випромінювач з грибоподібним робочим закінченням діаметром 18 мм і площею випромінювання 254 мм<sup>2</sup>, мікроскопи «Nu» та «Vertical» і предметні скельця, секундомір, термометр. Як досліджувані дисперсні середовища, що використовувались у експериментах, було використано проби вельми тонковкращених магнетитових кварцитів. Відбір проб здійснено при опробуванні ехнологічної схеми збагачення в умовах ПРАТ «Полтавський ГЗК»: живлення та розвантаження вертикального млина, живлення магнітної сепарації, концентратів та відходів флотації магнітних продуктів.

##### **4. 2. Методика проведення досліджень з ультразвукової обробки продуктів**

Для моделювання процесу поширення ультразвукового сигналу в текучому середовищі в умовах зміни швидкості поширення звуку і зміни щільності використовували метод  $k$ -space першого і другого порядку, заснований на системі лінійних рівнянь першого порядку [17].

Експериментальні дослідження продуктів проводилося за наведеною нижче схемою (рис. 1). Навішування проб продуктів піддавалися ультразвуковій обробці, далі проводилася промивка обробленого зразка в слабкому магнітному полі. Для зрівняння результатів в слабкому магнітному полі промивали зразок продукту, який не оброблений ультразвуком. Далі проводилися оптико-мінералогічні дослідження продуктів.



Рис. 1. Загальна схема проведення досліджень ультразвукової обробки проб пульпи

Вимірювання акустичної потужності полягало в її оцінці за ступенем підвищення температури  $\Delta T = T_2 - T_1$  рідкого середовища в об'ємі  $V$  за час впливу ультразвуку на рідину ( $t$ ), з відомою теплоємністю  $C$  і густиною  $\rho$  за такою формулою:

$$P = \frac{C\rho V\Delta T}{t}. \quad (1)$$

Оскільки практично вся акустична енергія перетворюється на теплову, вимір кінцевої температури  $t_2$  дозволяє за наведеною формулою обчислити величину акустичної потужності.

Використовуючи можливості скануючого мікроскопа, можна визначити наявність або відсутність адгезійних забруднень породними частинками на поверхні розкритих рудних зерен. За допомогою спектроскопії і програмних засобів, можливо, визначити мінеральний склад забруднень, розміри нерудних включень тощо. Всі зображення растрового електронного мікроскопа виконані у відтінках сірого кольору. Для ефекту візуалізації такі зображення малопримітні, оскільки при зниженні крупності досліджуваних часток контрастність з-

браження зростає. У деяких випадках, зображення рудних і породних зерен виглядають однаково, а розрізнити їх можливо тільки за результатами спектроскопії. Тому в дослідженнях пріоритетними показниками ступеня очищення стали хімічний аналіз оброблених продуктів і тести на збагачуваність за допомогою трубки Девіса.

## 5. Результати моделювання впливу ультразвукового сигналу в середовищі

Математичний опис кавітаційних процесів в неоднорідній гетерогенному середовищі пристосований до флотаційного процесу збагачення залізних руд детально розглянуто в роботі [16].

Для створення моделі впливу високоенергетичного ультразвуку на потік пульпи необхідно виконати розрахунок пристрою формування високоенергетичного ультразвуку з керованими параметрами.

Для двовимірного середовища без втрат, ці рівняння поширення ультразвукового сигналу в текучому середовищі в умовах зміни швидкості поширення звуку і зміни щільності використовують мають такий вигляд [17, 18]:

$$\rho(r) \frac{\partial u(r,t)}{\partial t} = -\nabla p(r,t),$$

$$\frac{1}{\rho(r)c(r)^2} \frac{\partial p(r,t)}{\partial t} = -\nabla u(r,t), \quad (2)$$

де  $u$  – вектор коливання швидкості ультразвукової частки з компонентами  $u_x$  та  $u_y$ ,  $p$  – флуктуації ультразвукового тиску,  $\rho(r)$  – щільність середовища,  $c(r)$  – швидкість звуку в середовищі,  $r$  вектор координат  $(x, y)$ .

Хвильове рівняння другого порядку, яке відповідає виразу (2) має такий вигляд [17, 18]:

$$\nabla \left( \frac{1}{\rho(r)} \nabla p(r,t) \right) - \frac{1}{\rho(r)c(r)^2} \frac{\partial^2 p(r,t)}{\partial t^2} = 0. \quad (3)$$

Розглянемо процедуру чисельного вирішення наведених вище рівнянь методом k-спасе. Для спрощення міркувань вважаємо, що швидкість звуку і щільність є постійними, тобто  $\rho(r) = \rho_0$ ,  $c(r) = c_0$ . Загальні принципи, які знаходяться в основі методу k-спасе надано в роботі [19]. При цьому метод, який розглядається, може бути розширений до випадку гетерогенного середовища.

Для вузькосмугових сигналів, таких як ультразвукові імпульси, можуть бути отримані дуже точні просторові похідні, що отримані за допомогою перетворення Фур'є поля тиску [20].



Цей принцип знаходиться в основі псевдоспектральних методів, описаних зокрема в [21]. Просторові похідні з рівняння (2) обчислюються з використанням дискретного перетворення Фур'є і часової ітерації, що реалізуються з використанням методів Адамса-Башфорта і Адамса-Мультона четвертого порядку. Для випадку однорідної швидкості звуку і щільності рівняння (3) можна записати в просторово-частотній області наступним чином

$$\frac{\partial^2 \hat{p}(k,t)}{\partial t^2} = -c_0^2 k^2 \hat{p}(k,t), \quad (4)$$

де  $\hat{p}(k,t)$  є двовимірне просторове перетворення Фур'є флуктуації ультразвукового тиску  $p(r,t)$ .

Дискретне уявлення лівій частини рівняння (3) отримано з використанням методу кінцевих різниць другого порядку. Отже, наближений псевдоспектральний метод описується виразом

$$\frac{p(r,t + \Delta t) - 2p(r,t) + p(r,t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} = c_0^2 F^{-1}(k^2 F(p(r,t))), \quad (5)$$

де  $F$  – оператор двовимірного просторового перетворення Фур'є. У численних реалізаціях рівняння (4) просторові похідні від правої частини рівняння (3) точно представлені з використанням дискретного перетворення Фур'є.

Але розглянуті псевдоспектральні методи [17, 20, 21], як правило, використовують методи часового інтегрування вищого порядку, щоб зменшити помилки дисперсії. Проте, для однорідного середовища часова ітерація може бути виконана точно, тобто без будь-якої дисперсії з використанням методу  $k$ - $t$  простору [19].

$$\frac{\hat{p}(k,t + \Delta t) - 2\hat{p}(k,t) + \hat{p}(k,t - \Delta t)}{(\Delta t)^2 \sin^2(c_0 \Delta t k / 2) / (c_0 \Delta t k / 2)^2} = -(c_0 k)^2 \hat{p}(k,t). \quad (6)$$

Метод часової ітерації математично еквівалентний методу, спочатку представлено у роботі [17].

Як показано в роботі [19], часова точність даного методу впливає з точного дискретного представлення диференціального рівняння гармонічного осцилятора, описаного в роботі [22]. Часова ітерація може бути виконана в просторово-частотній області, як показано в роботі [19] з використанням узагальненої форми рівняння (5). Також, еквівалентний ітераційний метод може бути отримано за допомогою зворотного просторового перетворення Фур'є рівняння (5). Отримана ітераційна формула має вигляд [17]

$$\frac{p(r,t + \Delta t) - 2p(r,t) + p(r,t - \Delta t)}{(\Delta t)^2} = c_0^2 F^{-1} \left( k^2 \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right), \quad (7)$$

До правої частини рівняння (6) застосовується k-спасе оператор другого порядку, який має вигляд:

$$\left( \nabla^{(c_0 \Delta t)} \right)^2 p(r,t) \equiv -F^{-1} \left( k^2 \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)^2}{(c_0 \Delta t k / 2)^2} F(p(r,t)) \right), \quad (8)$$

де  $(c_0 \Delta t)$  – верхній індекс позначає, що використовуються оператори є стандартним оператором градієнта, але при цьому є функціями параметра  $(c_0 \Delta t)$ .

Форма рівняння (6) говорить про те, що метод k-спасе другого порядку можна розглядати як модифікований метод кінцевих різниць, в якому просторовий лапласіан замінюється k-спасе оператором. Проте, k-спасе оператор в рівнянні (7) включає в себе не тільки спектральну оцінку лапласіан, а й елемент часової корекції, пов'язаний з  $k-t$  просторовим ітератором рівняння (5).

Для застосування методу k-спасе до системи рівнянь першого порядку, що описують поширення хвиль, може бути використаний k-спасе оператор другого порядку. Для цього оператор другого порядку розділяють на частини, які пов'язані з кожним просторовим напрямком. Для двовимірного випадку ця процедура виконується в такий спосіб

$$\begin{aligned} \frac{\partial p(r,t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^+}_x} &\equiv F^{-1} \left( ik_x e^{ik_x \Delta x / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right); \\ \frac{\partial p(r,t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^+}_y} &\equiv F^{-1} \left( ik_y e^{ik_y \Delta y / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right); \\ \frac{\partial p(r,t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^-}_x} &\equiv F^{-1} \left( ik_x e^{ik_x \Delta x / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right); \\ \frac{\partial p(r,t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^-}_y} &\equiv F^{-1} \left( ik_y e^{ik_y \Delta y / 2} \frac{\sin(c_0 \Delta t k / 2)}{c_0 \Delta t k / 2} F(p(r,t)) \right), \end{aligned} \quad (9)$$

так що

$$\left( \frac{\partial p(r,t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^+}_x} \frac{\partial p(r,t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^-}_x} + \frac{\partial p(r,t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^+}_y} \frac{\partial p(r,t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^-}_y} \right) p(r,t) = \left( \nabla^{(c_0 \Delta t)} \right)^2 p(r,t). \quad (10)$$

Просторово-частотні компоненти  $k_x$  і  $k_y$  визначені так, що  $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ .

Використання операторів рівняння (8) у рівнянні (2) дозволяє сформувати  $k$ -спрсе метод першого порядку еквівалентний рівнянням (6). Застосування експоненціальних коефіцієнтів з рівняння (8) вимагає оцінки швидкостей ультразвукової хвилі  $u_x$  і  $u_y$  по точках сітки в с інтервалами  $\Delta x/2$  і  $\Delta y/2$  відповідно. Отриманий алгоритм має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{u_x(r_1, t^+) - u_x(r_1, t^-)}{\Delta t} &= \frac{1}{\rho(r_1)} \frac{\partial p(r, t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^+} x}; \\ \frac{u_y(r_2, t^+) - u_y(r_2, t^-)}{\Delta t} &= \frac{1}{\rho(r_2)} \frac{\partial p(r, t)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^+} y}; \\ \frac{p(r, t + \Delta t) - p(r, t)}{\Delta t} &= -\rho(r) c(r)^2 \left( \frac{\partial u_x(r_1, t^+)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^-} x} + \frac{\partial u_y(r_2, t^+)}{\partial^{(c_0 \Delta t)^-} y} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

де

$$\begin{aligned} r_1 &\equiv (x + \Delta x / 2, y), \quad r_2 \equiv (x, y + \Delta y / 2), \\ t^+ &\equiv t + \Delta t / 2, \quad t^- \equiv t - \Delta t / 2. \end{aligned} \quad (12)$$

У рівнянні (11), замість коефіцієнтів  $c_0$  і  $\rho_0$  використано просторово змінювані значення швидкості звуку та густини  $c(r)$  і  $\rho(r)$ . Просторовий розподіл у рівнянні (10) неявно включається у просторові похідні розглянутих операторів. Наприклад, оператори  $\partial / \partial^{(c_0 \Delta t)^+} x$  і  $\partial / \partial^{(c_0 \Delta t)^-} x$ , що визначаються за формулою (9), відповідають похідним, розрахованим після просторових зсувів  $\Delta x/2$  та  $-\Delta x/2$  відповідно.

Характер зміни концентрації часток і розподілення їх за розмірами в полі високоенергетичного ультразвуку залежить від щільності самих часток, частоти та інтенсивності впливає випромінювання.

Оцінимо вплив радіаційного тиску ультразвуку на зміну концентрації часток радіуса  $r$ . Нехай в позитивному напрямку осі  $x$  тече пульпа зі швидкістю  $V$ . Позначимо через  $n_r(Z, t)$  концентрацію часток радіуса  $r$  на глибині  $Z$  в момент часу  $t$ . З урахуванням вищевикладеного можна записати

$$\frac{\partial n_r(Z, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Z} [V_r(Z, t) n_r(Z, t)]. \quad (13)$$

У цьому рівнянні  $V_r(Z, t)$  – швидкість зсуву частки радіуса  $r$  з координатою  $Z$  в ультразвуковому полі. Швидкість спрямована уздовж осі  $z$ , тобто перпендикулярна потоку пульпи. У загальному випадку вона залежить від часу  $t$ , так як в результаті дії ультразвуку змінюється концентрація часток, а це призводить до зміни інтенсивності ультразвуку, що, в кінцевому рахунку, позначається на швидкості зсуву часток. Однак це значно ускладнює рішення рівняння (12), тому будемо припускати, що швидкість залежить тільки від координати  $Z$ .

Вважаючи, що інтенсивність ультразвукової хвилі  $I$  змінюється за експоненціальним законом (початкове значення), коефіцієнт її загасання  $\alpha$  залежить від частоти звуку  $\nu_0$  і з урахуванням аналізу, виконаного в роботі [23], концентрація часток  $n_r(Z, t)$  визначається за формулою

$$n_r(Z, t) = n_0 \frac{e^{\alpha z}}{e^{\alpha z} - \alpha \beta t}, \quad (14)$$

де  $n_r(Z, 0) = n_0$ ,  $n_r(0, t) = 0$  – початкові і граничні умови;

$$St(X) = \begin{cases} 0, & X < 0; \\ 1, & X \geq 0; \end{cases}$$

$$\beta = \frac{2r(kr)^4}{27\eta c} I_0 \left( a_1^2 + a_1 a_2 + \frac{3}{4} a_2^2 \right);$$

$$a_1 = 1 - \frac{rc^2}{\rho c^2}; \quad a_2 = 2 \frac{\rho - \rho}{2\rho + \rho};$$

$\rho_r, c_r$  – щільність частки і швидкість ультразвуку в матеріалі частки;  $\rho, c$  – щільність досліджуваної середовища і швидкість ультразвуку в ній.

При збільшенні інтенсивності високоенергетичного ультразвуку від нуля до певного значення і постійної швидкості потоку пульпи в зону вимірювань можуть бути зміщені всі або тільки окремі класи крупності подрібненого матеріалу [23].

$$F(r) = \left( \int_0^{r_1} f(r)r^3 dr + \int_{r_1}^{r_2} f(r)r^3 dr + \dots + \int_{r_{m-1}}^{r_m} f(r)r^3 dr \right) / \int_0^{r_m} f(r)r^3 dr. \quad (15)$$

Потужність високоенергетичного ультразвуку, що дозволяє здійснювати прогнозоване зміщення часток подрібненої руди певної маси в потоці пульпи, розраховано за допомогою пакета HIFU Simulator v1.2 [24].

Таким чином, моделювання і аналіз динамічних ефектів високоенергетичного ультразвуку при впливі на рудну пульпу дозволили розробити метод змінення траєкторії руху часток певного класу крупності.

У роботі [25] досліджено вимушені коливання монополярних доменних границь під дією ультразвукових хвиль, що поширюються уздовж неї. Дане явище пояснюється тим, що ультразвук викликає в частках заліза змінні механічні напруження, що призводить до збільшення величини магнітопружної енергії  $U_d$ , яка у загальному випадку визначається з виразу [26]:

$$U_d = -\sigma \cdot \lambda, \quad (16)$$

де  $\lambda$  – магнітострикція,  $\sigma$  – напруження. Відповідно до закону анізотропії М.С. Акулова вираз для  $U_d$  приймає такий вигляд:

$$U_d = -\sigma \cdot \left( a_1 \sum_{i=1,2,3} \left( S_i^2 \beta_i^2 - \frac{1}{3} \right) + a_2 \sum_{i \neq j} (S_i S_j \beta_i \beta_j) \right), \quad (17)$$

Для збереження умови:

$$\frac{\partial (U_k + U_d + U_n)}{\partial \alpha} = 0, \quad (18)$$

де  $U_k$  – енергія магнітної анізотропії кристала;  $U_n$  – енергія зовнішнього магнітного поля.

Відповідно до виразів (15)–(18), якщо зміниться енергія  $U_n$ , то і намагніченість часток збільшиться.

Нижче розглянута конструкція каналу впливу високоенергетичних ультразвукових коливань на потік пульпи, виконаного за технологією ультразвукової фазованої решітки.

Ультразвукова фазована решітка розглядається як множина точкових джерел ультразвуку, розташованих на однаковій відстані ( $d$ ) один від одного. При розробці конструкції досліджено вплив відстані між елементами, довжини хвилі і кількості елементів на керованість і ефективність ультразвукового випромінювання [23].

Тиск ультразвукового поля визначено з використанням принципу Гюйгенса за формулою [27]

$$p(r, \theta, t) = \frac{p_0 r_0}{r} \frac{\sin(\chi N)}{\sin(\chi)} e^{-j\chi(N-1)} e^{j(\omega t - kr)},$$

$$\chi = \frac{\omega \Delta \tau - kd \sin \theta}{2}, \quad (19)$$

де  $r_0$  – нескінченно малий радіус пульсуючих точкових джерел ультразвукового випромінювання;  $p_0$  – амплітуда тиску точкових джерел ультразвукового випромінювання;  $k$  – хвильове число;  $\omega$  – кутова частота;  $N$  – кількість точкових джерел ультразвукового випромінювання;  $j$  – уявна одиниця.

Необхідний час затримки між сусідніми джерелами визначається напрямленням ультразвукового випромінювання під кутом  $\theta_s$  та задається співвідношенням [28]

$$\Delta\tau = \frac{d \sin \theta_s}{c}, \quad (20)$$

де  $c$  – швидкість звуку в середовищі поширення (еталонної рідини – воді і залізородної пульпи відповідно).

Спрямованість ультразвукового випромінювання, виходячи з виразу (8), тоді буде визначена у вигляді:

$$H(\theta) = \frac{\left| \sin \left( \frac{\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} \right) \right|}{\left| N \sin \left( \frac{\pi d (\sin \theta_s - \sin \theta)}{\lambda} \right) \right|}. \quad (21)$$

Оптимальні параметри ультразвукової фазованої решітки обрані на основі показників, що характеризують діаграму спрямованості ультразвукової фазованої решітки (рис. 2).

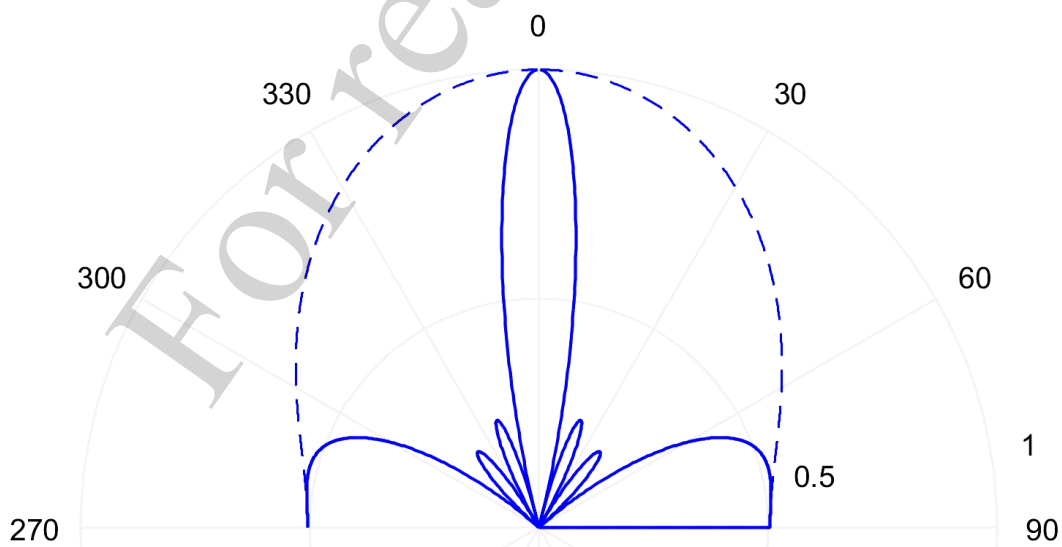


Рис. 2. Діаграма спрямованості ультразвукової фазованої решітки:  
 — — сумарна; - - - - точкового елемента

Показник ширини (загостреності) головної пелюстки діаграми з урахуванням (20) визначається за формулою

$$q = \frac{1}{\pi} \left( \sin^{-1} \left( \sin \theta_s + \frac{\lambda}{Nd} \right) - \sin^{-1} \left( \sin \theta_s - \frac{\lambda}{Nd} \right) \right). \quad (22)$$

В даному випадку, кращій спрямованості відповідає менше значення показника  $q$ . Слід зазначити, що в разі, коли значення виразу  $\lambda/Nd$  наближається до нуля, тоді значення  $q$  також прямує до нуля. Таким чином, кращої спрямованості можна досягти, застосовуючи більшу кількість точкових випромінюючих елементів або збільшуючи відстань між цими елементами.

Виходячи з виразу (22), що описує показник ширини головної пелюстки діаграми спрямованості можна зробити висновок, що збільшення кількості елементів ультразвукової фазованої решітки відвищує ефективність. Однак, результати дослідження [27] показують, що значення показника  $q$  різко зменшується при варіюванні кількості п'єзоелементів в фазованій решітці до 8 штук. А при кількості елементів, що перевищує 32, збільшення їх числа не приносить істотного поліпшення показника  $q$ . З урахуванням цієї обставини, оптимальною кількістю елементів, з точки зору покращення показника направленості фазованої решітки та вартості її виготовлення, є 16 [23, 27].

Відстань між елементами також є істотним показником, який впливає на показник спрямованості  $q$  випромінювання ультразвукової фазованої решітки. В роботі [27] показано, що краще значенням показника спрямованості відповідає більшу відстань між елементами фазованої решітки. Однак слід зазначити, що поряд зі змінням показника спрямованості  $q$ , також збільшуються бічні пелюстки діаграми спрямованості. Це підтверджують, представлені на рис. 9 результати розрахунку діаграм спрямованості ультразвукової фазованої решітки з 16 елементами (4×4) при зміні відстані між елементами від 0,4 мм до 0,7 мм з кроком 0,1 мм.

Отже, необхідно знайти компромісне значення відстані між елементами фазованої решітки. Дане значення, з одного боку, забезпечує оптимальний рівень спрямованості випромінювання, а з іншого – забезпечує зменшення бічних пелюсток діаграми спрямованості. З рівняння (20) за умови  $H(\pi/2)=1$  визначається відстань між елементами фазованої решітки

$$d_{cr} = \frac{1}{1 + \sin \theta_s}. \quad (22)$$

В результаті моделювання та розрахунку, отримано оптимальне значення відстані між елементами ультразвукової фазованої решітки, яке дорівнює  $d_{cr} = 0,45$  мм.

Тривимірне представлення діаграми спрямованості даної ультразвукової фазованої решітки наведено на рис. 3.

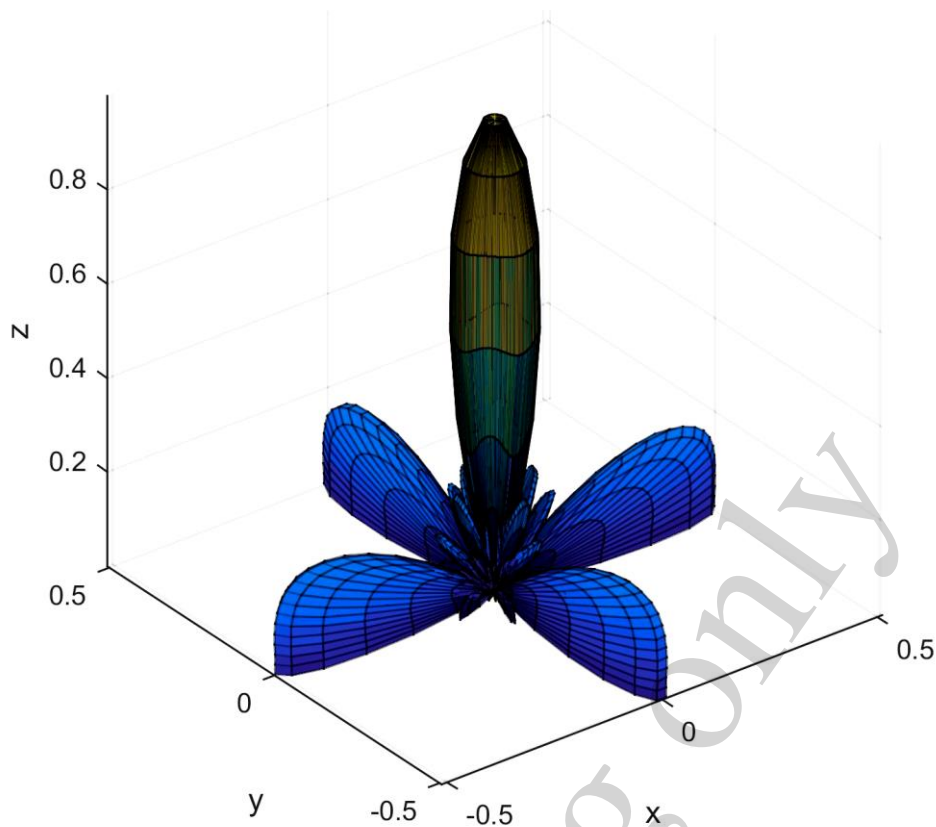


Рис. 3. Діаграма спрямованості ультразвукової фазованої решітки при відстані між елементами  $d_{cr}=0,45$  мм

Таким чином, застосування попередньої обробки залізорудної пульпи за допомогою високоенергетичного ультразвуку є перспективним напрямком підвищення ефективності процесу флотаційного доведення залізорудного концентрату шляхом очищення часток корисного компонента від шламу. Даний підхід може бути доведено, що ефективність ультразвукової обробки пов'язана з оновленням поверхонь часток, що призводить до збільшення контрастності магнітних і флотаційних властивостей мінералів.

## 6. Обговорення результатів дослідження ультразвукового впливу на показники магнітно-флотаційного збагачення

Для підтвердження результатів моделювання було відібрано проби продуктів з технологічних потоків магнітно-флотаційного збагачення тонко та вельми тонковкраплених магнетитових кварцитів Кременчуцького залізорудного району. Проби оброблялись з використанням імпульсного магнітного поля спадної напруженості та високоенергетичного ультразвуку в кавітаційному режимі, модульованого високочастотними імпульсами. Подрібнення у вертикальному млині розкриває зростки нерудних мінералів з магнетитом у вигляді часток різної крупності. Матеріал розвантаження млина характеризується великим вмістом нерудних мінералів: кварц – 12,5 %, кумінгтоніт – 5,3 %, карбонат – 4,9 %, егірін і рибекіт – 2 %, гідроксиди заліза – 2,2 %. Нерудні мінерали представлені мікродисперсними мінеральними утвореннями. Вміст в матеріалі



складає 24–26 %. Щільність цих нерудних мінералів у порівнянні з магнетитом або гематитом менше в 1,5–2 рази. Тобто, продукт розвантаження млина є сумішшю мінеральних рудних і нерудних зерен з об'ємним співвідношенням їх ~2:1. Такий продукт є складним і за крупністю і за співвідношенням рудних і нерудних мінералів для процесів розділення в магнітних полях і вимагає застосування багато стадійного збагачення. Як показав мінералогічний аналіз, поверхні мінеральних часток в розвантаженні млина найменш забруднені шлаками в порівнянні з іншими продуктами. Однак, розділення в лабораторній експериментальній установці продукту без попередньої ультразвукової обробки не дозволило значно покращити якість матеріалу – масова частка  $Fe_{\text{заг}}$  в очищеному продукті підвищилася на 0,41 %. Тоді, як після ультразвукової обробки протягом 60 с і інтенсивністю впливу  $1,62 \text{ Вт/см}^2$  якість очищеного продукту підвищився додатково на 0,4–0,5 % при одночасному підвищенні вилучення магнетиту – на 1,1 %. Ультразвуковий вплив створив сприятливі умови для розділення навіть порівняно «чистих» по поверхневому забрудненню дрібнодисперсних часток. Одночасно з підвищенням якості очищеного продукту збільшився його вихід за рахунок селективної магнітної флокуляції дрібнодисперсних очищених від нерудних шлаків часток магнетиту. Ефективність очищення продукту, а саме зливу вертикального млина від нерудних мінералів, розрахована за критерієм Хенкока-Луйкена, при застосуванні ультразвукової обробки підвищилася на 2,2–2,5 % або в 1,8–2,1 рази.

Надалі досліджувався вплив інтенсивності ультразвукового впливу на показники очищення мінеральної поверхні від шламових часток.

Ультразвукова обробка матеріалу з інтенсивністю впливу  $1,6 \text{ Вт/см}^2$  і тривалістю до 60 с дозволила отримати диспергований матеріал з незначною величиною шламових покриттів мінеральних зерен. З підвищенням інтенсивності ультразвукового впливу до  $2,2\text{--}2,95 \text{ Вт/см}^2$  показники очищення продуктів різко знижуються. Ультразвукова обробка дозволяє очищати поверхню рудних часток від всіляких мінеральних покриттів. В [11] була показана можливість ультразвукового очищення мінералів від оксидів заліза. Фізичною основою застосування ультразвуку є його диспергуюча дія на дисперсійне середовище [29]. Однак, ультразвукова обробка, особливо систем рідина – тверде, може призводити і до коагуляції часток, злипання (коалесценції) [30]. Початковий етап цього процесу полягає в зближенні часток дисперсної фази і взаємної їх фіксації на невеликих відстанях один від одного. Між частинками залишаються прошарки середовища: подвійні електричні шари і гідратні оболонки часток. Тривалий та інтенсивний ультразвуковий вплив на пульпу може призвести не тільки до кавітаційного диспергування дрібнодисперсних часток, але істотно, до зміни властивостей, як рідкої фази, так і поверхонь твердих зерен. Тому при ультразвуковому впливі на пульпу повинен існувати оптимальний режим диспергування за інтенсивністю впливу на пульпу ультразвукової хвилі і тривалість процесу.

Насичення пульпи кавітаційними парогазовими бульбашками підвищує її хвильовий опір. Підвищення хвильового опору рідкого середовища призводить до підвищення виведення в нього акустичної енергії, тобто збільшуються акти-

вні втрати, пов'язані з випромінюванням ультразвукової енергії в середовище. Парогазові бульбашки поглинають енергію ультразвукових хвиль і екранують тверді частинки від їх впливу. Акустична потужність, яка вводиться в середовище, підвищується, а ефективність її впливу на тверді частинки знижується.

Високі значення ультразвукових впливів змінюють кінематику коливального руху мінеральних частини, збільшується ймовірність їх зіткнення між собою і газовими бульбашками. Відбувається зниження поверхневої енергії часток і коагуляція. Як показали результати експериментів, при високій інтенсивності ультразвукового впливу або при тривалому впливі на пульпу вихід очищеного продукту зростає. Це відбувається за рахунок збільшення вмісту в ньому сфлукуюваних нерудних і рудних мінералів, а якість його знижується. Так, наприклад, зі збільшенням ультразвукової обробки з 60 с до 240 с, кількість за своєю пульпою ультразвукової потужності підвищується з 3,5 Вт до 11,5–12 Вт, а якість продукту, який очищується, знижується. Відбувається дисипація ультразвукової енергії в рідкій фазі пульпи, що є причиною різкого зниження ефективності обробки.

Аналіз результатів ультразвукової обробки продукту живлення зворотної флотації магнетиту показав наступне. Зі збільшенням інтенсивності ультразвукового впливу якість відмитого продукту підвищується на 0,3–0,48 % до досягнення максимуму. При подальшому підвищенні інтенсивності якісні показники знижуються незначно на відміну від попереднього експерименту, де спостерігалось різке зниження якості. Це пояснюється тим, що продукт характеризується значно меншим вмістом великих нерудних зерен. Вихід продукту після ультразвукової обробки підвищується при інтенсивності 1,2–1,9 Вт/см<sup>2</sup> і часу обробки 60–120 с. При більшій інтенсивності обробки вихід знижується. Тривалість обробки 240 с призводить до зменшення виходу відмитого продукту в усьому інтервалі інтенсивності впливу. Оптимальними параметрами обробки за показником вилучення Fe<sub>зар</sub> в відмитому продукті при очищенні мінеральних часток є інтенсивність 1,2 Вт/см<sup>2</sup> і час обробки не більше 60 сек. При тому вихід очищеного продукту підвищується на 0,8 %, а його якість на 0,9 %. Ефективність відмивання за показником Хенкока-Луїкіна підвищується із застосуванням ультразвукової обробки з 1,7 % до 3,1 % тобто в 1,8 рази.

Для оцінки втрат рудного мінералу з відходами та ступеня засмічення флотоконцентрату нерудними дрібнодисперсними частинками проведені дослідження з ультразвукової обробки концентрату і відходів флотації. Після ультразвукової обробки якість флотоконцентрату практично не змінюється, а при тривалій обробці навіть незначно знижується. Це пов'язано з тим, що всі мінеральні зерна інтенсивно очистилися в процесі ультразвукової обробки, проте потрапляючи в слабе магнітне поле експериментальної установки в рідкій фазі ці зерна утворюють магнітні флокули, до складу яких входять бідні залізовмісні силікати. В цьому випадку якість кінцевого концентрату не росте, але вихід збільшується

Аналіз результатів очищення відходів флотаційного доведення магнетитових концентратів показав, що ультразвуковий вплив очищає поверхні мінералів від шламових часток і диспергує в цілому тверду фазу. Це створює сприятливі

умови для видалення нерудних мінералів в експериментальних умовах. Вихід відмитого продукту (відходів) знижується на 1,8–2 % а з підвищенням інтенсивності впливу – більш 1,62 Вт/см<sup>2</sup> зростає. Масова частка заліза в цьому продукті знижується на 2,2–2,3 %, при цьому ефективність очищення підвищується в 1,4 рази.

Ультразвуковий вплив також знижує масову частку нерудних оксидів в очищених продуктах проб флотаційного доведення. В інтервалі інтенсивності ультразвукового впливу від 1,2 до 2,2 Вт/см<sup>2</sup> має місце значне зниження концентрації оксидів в очищеному продукті. Концентрація оксидів K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в очищеному продукті знижується в 1,2–3 рази. Подальше збільшення інтенсивності призводить до зниження ефективності ультразвукового впливу.

У перспективні високоенергетичний ультразвук може бути використано для підвищення ефективності основних технологічних процесів збагачувального виробництва. У процесі збагачення, як показують дослідження [31, 32], необхідно враховувати розподіл фізичних і мінералогічних характеристики руди по класам крупності. Особливої ваги зазначені характеристики рудної сировини набувають у процесі флотації [33, 34]. Обґрунтування необхідності вибору технологічних параметрів флотаційного процесу у відповідності до розподілу часток руди за розміром запропоновано у [33]. У праці [34] досліджено вплив хімічних характеристик рудних часток на ефективність процесу флотації. Дослідження показують, що наявність зазначеної інформації є важливим при оптимізації показників процесу збагачення руди [35–37], формуванні математичних моделей [38, 39], синтезі керування процесом збагачення [40–42]. Застосування високоенергетичного ультразвуку, як показано у даній роботі, дозволяє здійснити кероване зміщення часток певного розміру у зону вимінювання. Отже, стає можливим визначення розподілу певних фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик по класам крупності часток руди.

## 7. Висновки

Стандартні рішення в сучасних умовах не дозволяють досягти високих техніко-економічних показників виробництва. Отже, для переходу на новий технологічний рівень виробництва, що забезпечує якісні показники залізорудної сировини світового рівня, у результаті виконаних досліджень одержано наступне.

1. На основі результатів моделювання і аналізу динамічних ефектів ультразвукових коливань при впливі на рудну пульпу визначено оптимальне значення відстані між елементами фазованої решітки, що є джерелом ультразвукових коливань. Дане значення ( $d_{cr}=0,45$  мм) з одного боку забезпечує оптимальний рівень спрямованості випромінювання, а з іншого – забезпечує зменшення бічних пелюсток діаграми спрямованості

2. Встановлено, що застосування попередньої обробки залізорудної пульпи за допомогою високоенергетичного ультразвуку дозволяє підвищити ефективність очищення рудної сировини, Зокрема ефективність очищення від нерудних мінералів зливу вертикального млина за критерієм Хенкока-Луйкена підвищилась на 2,2–2,5 %.

3. Визначено оптимальні параметри обробки за показником вилучення заліза загального у очищеному продукті. При очищенні мінеральних часток інтенсивність має становити  $1,2 \text{ Вт/см}^2$ , час обробки не більше 60 сек. У такому випадку вихід очищеного продукту підвищується на 0,8 %, а його якість – на 0,9 %. Ефективність очищення за показником Хенкока-Луйкіна підвищується з 1,7 % до 3,1 %.

4. Встановлено, що ультразвуковий вплив також знижує масову частку нерудних оксидів в очищених продуктах проб флотаційного доведення. У інтервалі інтенсивності ультразвукового впливу від  $1,2$  до  $2,2 \text{ Вт/см}^2$  має місце значне зниження концентрації оксидів  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у очищеному продукті у 1,2–3 рази. Водночас, подальше збільшення інтенсивності призводить до зниження ефективності ультразвукового впливу.

### Література

1. Матюха, В. В. Современное состояние минерально-сырьевой базы черной металлургии Украины [Текст] / В. В. Матюха, Н. Т. Мовчан // Горный журнал. – 2011. – № 4. – С. 65–67.
2. Большаков, В. И. Горно-металлургический комплекс Украины (цифры, факты, комментарии). Бизнес-справочник [Текст] / В. И. Большаков, С. П. Василенко, Л. С. Галецкий и др.; под ред. В. А. Гнатуш. – К., 2009. – 732 с. – Режим доступа: [http://cgntb.dp.ua/pn\\_book.html](http://cgntb.dp.ua/pn_book.html)
3. Сентемова, В. А. Флотация в схемах обогащения магнетитовых руд [Текст] / В. А. Сентемова // Обогащение руд. – 2007. – № 2. – С. 18–22.
4. Олійник, Т. А. Розробка технологій очищення залізовмісних концентратів від шкідливих домішок [Текст] / Т. А. Олійник, Е. В. Часова, Л. В. Скляр, Н. В. Кушнірук, М. О. Олійник, А. Ю. Скляр // Збагачення корисних копалин. – 2016. – Вип. 62 (103). – С. 34–44.
5. Гончаров, С. А. Повышение эффективности обогатительных технологий путем воздействия высокоэнергетического ультразвука на перерабатываемое сырье [Текст] / С. А. Гончаров // Вісник Криворізького технічного університету. – 2009. – Вип. 23. – С. 236–239.
6. Гзогян, Т. Н. Теоретические и экспериментальные исследования получения высококачественных концентратов [Текст] / Т. Н. Гзогян // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 4. – С. 389–393.
7. Подгородецкий, Н. С. Автоматическое управление процессом раскрытия полезного компонента при измельчении руды [Текст] / Н. С. Подгородецкий // Вісник Криворізького технічного університету. – 2007. – № 19. – С. 120–124.
8. Пелевин, А. Е. Применение грохотов «Деррик» в замкнутом цикле измельчения на обогатительной фабрике ОАО «Комбинат КМАруда» [Текст] / А. Е. Пелевин, М. В. Лазебная // Обогащение руд. – 2009. – № 2. – С. 4–8.
9. Ширяев, А. А. Применение тонкого грохочения для повышения качества на обогатительной фабрике горно-обогатительного комплекса «АрселорМиталл Кривой Рог» [Текст] / А. А. Ширяев, Е. Н. Нескоромный, А. И. Миро-

ненко, С. А. Самохина, С. С. Старых // Вісник КНУ. – 2013. – Вип. 34. – С. 114–120.

10. Олійник, Т. А. Особливості збагачення залізних руд [Текст] / Т. А. Олійник, М. О. Олійник, Л. В. Скляр, А. Ю. Скляр // Збагачення корисних копалин. – 2017. – Вип. 67 (108). – С. 88–101.

11. Губин, Г. Г. Обобщение и анализ возможности использования ультразвуковых колебаний при переработке полезных ископаемых [Текст] / Г. Г. Губин, Т. П. Ярош, Л. В. Скляр // Збагачення корисних копалин. – 2016. – Вип. 62 (103). – С. 132–143.

12. Cao, Q. Surface cleaning and oxidative effects of ultrasonication on the flotation of oxidized pyrite [Text] / Q. Cao, J. Cheng, Q. Feng, S. Wen, B. Luo // Powder Technology. – 2017. – Vol. 311. – P. 390–397. doi: 10.1016/j.powtec.2017.01.069

13. Saikia, B. K. Ultrasonic assisted cleaning of high sulphur Indian coals in water and mixed alkali [Text] / B. K. Saikia, A. M. Dutta, L. Saikia, S. Ahmed, B. P. Baruah // Fuel Processing Technology. – 2014. – Vol. 123. – P. 107–113. doi: 10.1016/j.fuproc.2014.01.037

14. Yusof, N. S. M. Physical and chemical effects of acoustic cavitation in selected ultrasonic cleaning applications [Text] / N. S. M. Yusof, B. Babgi, Y. Alghamdi, M. Aksu, J. Madhavan, M. Ashokkumar // Ultrasonics Sonochemistry. – 2016. – Vol. 29. – P. 568–576. doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.06.013

15. Ambedkar, B. Ultrasonic coal-wash for de-sulfurization [Text] / B. Ambedkar, R. Nagarajan, S. Jayanti // Ultrasonics Sonochemistry. – 2011. – Vol. 18, Issue 3. – P. 718–726. doi: 10.1016/j.ultsonch.2010.09.006

16. 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.

17. Tabei, M. Ak-space method for coupled first-order acoustic propagation equations [Text] / M. Tabei, T. D. Mast, R. C. Waag // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2002. – Vol. 111, Issue 1. – P. 53–63. doi: 10.1121/1.1421344

18. Pierce, D. Acoustics: an introduction to its physical principles and applications [Text] / D. Pierce. – NY: Acoustical Society of America, 1989. – 678 p.

19. Mast, T. D. A k-space method for large-scale models of wave propagation in tissue [Text] / T. D. Mast, L. P. Souriau, D.-L. D. Liu, M. Tabei, A. I. Nachman, R. C. Waag // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2001. – Vol. 48, Issue 2. – P. 341–354. doi: 10.1109/58.911717

20. Fornberg, B. A practical guide to pseudospectral methods [Text] / B. Fornberg. – Cambridge: Cambridge University Press, 1996. – 231 p. doi: 10.1017/cbo9780511626357

21. Wojcik, G. Pseudospectral methods for large-scale bioacoustic models [Text] / G. Wojcik, B. Fomberg, R. Waag, L. Carcione, J. Mould, L. Nikodym, T. Driscoll // 1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. An International Symposium (Cat. No.97CH36118). – 1997. doi: 10.1109/ultsym.1997.661861

22. Mickens, R. A. Nonstandard finite difference models of differential equations [Text] / R. A. Mickens. – Singapore: World Scientific, 1993. – 264 p. doi: 10.1142/2081
23. Morkun, V. The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp [Text] / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – Issue 6. – P. 8–11.
24. Soneson, J. HIFU Simulator v1.2 [Electronic resource] / J. Soneson // Available at: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30886-high-intensity-focused-ultrasound-simulator>
25. Власко-Власов, В. К. Коливання монополярних доменних стінок в поле ультразвукової хвилі [Текст] / В. К. Власко-Власов, О. А. Тихомиров // Фізика твердого тіла. – 1991. – Т. 33, № 12. – С. 3498–3501.
26. Киренский, Л. В. Вплив ультразвуку на магнітні властивості феромагнетиків при різних температурах [Текст] / Л. В. Киренский, А. І. Дрокин, В. С. Черкашин // Магнітна структура феромагнетиків. – 1960. – С. 165–173.
27. Wooh, S.-C. Optimization of Ultrasonic Phased Arrays [Text] / S.-C. Wooh, Y. Shi // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 1998. – P. 883–890. doi: 10.1007/978-1-4615-5339-7\_114
28. Silk, M. G. Ultrasonic transducers for nondestructive testing [Text] / M. G. Silk. – Bristol: Adam Hilger Ltd, 1984. – 176 p.
29. Розенберг, Л. Д. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / Л. Д. Розенберг. – М.: Наука, 1970. – 678 с.
30. Курьяков, В. Н. Исследование воздействия ультразвукового диспергирования на кинетику агрегации асфальтенов в модельных системах [Текст] / В. Н. Курьяков // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. – 2013. – Вып. 2 (8). – С. 22–30.
31. Golik, V. Metal deposits combined development experience [Text] / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun, O. Burdzieva // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Issue 6. – P. 591–594.
32. Morkun, V. Automation of iron ore raw materials beneficiation with the operational recognition of its varieties in process streams [Text] / V. Morkun, V. Tron // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – Issue 6. – P. 4–7.
33. Norori-McCormac, A. The effect of particle size distribution on froth stability in flotation [Text] / A. Norori-McCormac, P. R. Brito-Parada, K. Hadler, K. Cole, J. J. Cilliers // Separation and Purification Technology. – 2017. – Vol. 184. – P. 240–247. doi: 10.1016/j.seppur.2017.04.022
34. Sahoo, H. Role of silica and alumina content in the flotation of iron ores [Text] / H. Sahoo, S. S. Rath, D. S. Rao, B. K. Mishra, B. Das // International Journal of Mineral Processing. – 2016. – Vol. 148. – P. 83–91. doi: 10.1016/j.minpro.2016.01.021
35. Morkun, V. Ore preparation multi-criteria energy-efficient automated control with considering the ecological and economic factors [Text] / V. Morkun, V. Tron // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – Issue 5. – P. 4–7.
36. Kupin, A. Research of properties of conditionality of task to optimization of processes of concentrating technology is on the basis of application of neural

networks [Text] / A. Kupin // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – Issue 4. – P. 51–55.

37. Yu, J. Beneficiation of an iron ore fines by magnetization roasting and magnetic separation [Text] / J. Yu, Y. Han, Y. Li, P. Gao // International Journal of Mineral Processing. – 2017. – Vol. 168. – P. 102–108. doi: 10.1016/j.minpro.2017.09.012

38. Morkun, V. Model synthesis of nonlinear nonstationary dynamical systems in concentrating production using Volterra kernel transformation [Text] / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Issue 10. – P. 6–9.

39. Ebadnejad, A. Investigating of the effect of ore work index and particle size on the grinding modeling of some copper sulphide ores [Text] / A. Ebadnejad // Journal of Materials Research and Technology. – 2016. – Vol. 5, Issue 2. – P. 101–110. doi: 10.1016/j.jmrt.2015.05.002

40. Morkun, V. Distributed closed-loop control formation for technological line of iron ore raw materials beneficiation [Text] / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Issue 7. – P. 16–19.

41. Wołosiewicz-Głąb, M. Construction of the electromagnetic mill with the grinding system, classification of crushed minerals and the control system [Text] / M. Wołosiewicz-Głąb, S. Ogonowski, D. Foszcz // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, Issue 20. – P. 67–71. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.098

42. Morkun, V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric [Text] / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – Issue 5. – P. 7–11.