

УДК 504.55.054:622(470.6)

В.С. МОРКУН, Н.В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори, О.Ю. СЕРДЮК, асистент
Криворізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО УЛЬТРАЗВУКУ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ ЧАСТОК ТВЕРДОЇ ФАЗИ ПУЛЬПИ

Мета. Метою даної роботи є підвищення якості автоматизованого керування процесом дешламації шляхом побудови моделі осадження частинок твердої фази рудної суспензії в дешламаторі під впливом радіаційного тиску високоенергетичного ультразвуку.

Методи дослідження. У роботі використано методи чисельного моделювання, аналітичного конструювання і комп'ютерного моделювання, комп'ютерні інформаційні та програмні технології для підвищення якості інформаційного забезпечення автоматизованого керування процесом дешламації.

Наукова новизна. У роботі пропонується метод оцінки параметрів процесу осадження часток твердої фази рудної суспензії в контрольованій зоні дешламатора на основі аналогії з керованим впливом на них радіаційного тиску високоенергетичного ультразвуку, що дозволяє здійснювати прогнозує керування характеристиками згущеного продукту дешламатора та підвищити якість магнітного продукту.

Практична значимість полягає у розробленні інформаційної бази для формування прогнозуючого керування характеристиками згущеного продукту дешламатора шляхом розробки математичної моделі проходження ультразвукової хвилі через тверду фазу рудної суспензії, моделювання та верифікація побудованої моделі в програмному пакеті Wave Form Revealer.

Результати. На основі результатів дослідження впливу динамічних ефектів високоенергетичного ультразвуку на тверду фазу рудної суспензії в контрольованій зоні дешламатора теоретично обґрунтований і експериментально апробований метод просторового впливу, що дозволяє здійснювати цілеспрямоване зміщення часток подрібненої руди певної маси і змінення фракційного складу твердої фази рудної суспензії. На підставі аналогії між фізичним впливом радіаційного тиску високоенергетичного ультразвуку на частки твердої фази рудної суспензії і їх поведінкою в гравітаційному полі в початковій стадії процесу осадження в дешламаторі моделюються основні його параметри для формування прогнозуючого керування характеристиками згущеного продукту. Середньоквадратична розбіжність між моделлю і експериментом в контрольних точках гранулометричної характеристики складала 0,87%.

Ключові слова: керування технологічним процесом збагачення руди, дешламатор, рудна суспензія, автоматизація, високоенергетичний ультразвук, моделювання, хвилі Лемба, осадження часток подрібненої руди.

doi: 10.31721/2306-5451-2019-1-48-3-8

Проблема і її зв'язок з науковими і практичними задачами. Технологічні процеси рудо-збагачувальних фабрик передбачають видалення шламів перед збагачувальним переділом, що здійснюється за допомогою гідроциклонів і дешламаторів. Метою цих операцій є видалення з пульпи тонкодисперсної частини подрібненої руди (шламів) для підвищення якості магнітного продукту. Зменшити негативний вплив змін характеристик вихідної руди на енергоспоживання технологічних комплексів збагачувальної фабрики і при цьому максимізувати їх продуктивність по концентрату заданої якості можливо тільки при наявності оперативної інформації про основні характеристики сировини і продуктів збагачення і ефективного їх використання в технологічному процесі. З підвищенням вимог до якості кінцевого продукту збагачувального виробництва все більш актуальним стає використання нових наукоємних технологій розділових процесів. До таких, зокрема, відноситься ультразвукова обробка сировини, що переробляється.

Аналіз досліджень і публікацій. Високоенергетичний ультразвук є ефективним засобом впливу на ряд фізичних, хімічних і біологічних процесів. Інтенсивні хвилі мають ряд особливостей, різко відмінних від властивостей хвильових процесів малої інтенсивності. Врахування цих особливостей дозволяє ідентифікувати мінеральні різновиди руди, підвищити селективність поділу мінералів відповідно до їх властивостями і за рахунок цього зменшити енерго- і ресурсомісткість технологічного процесу збагачення, підвищити якість його кінцевого продукту. Для визначення параметрів керування технологічним процесом збагачення руди розроблено ряд методів і засобів, що дозволяють здійснювати вимірювання характеристик рудного матеріалу із застосуванням ультразвукових технологій [1, 2, 4-9].

Поширення високоенергетичного ультразвуку супроводжується цілим рядом ефектів, що характеризуються залежністю від амплітуди хвилі. Наявність так званих нелінійних ефектів істотно змінює картину поширення інтенсивної ультразвукової хвилі і, зокрема, характер її

взаємодії з середовищем [8-10]. Під впливом потужного ультразвуку в рідкому середовищі виникають акустичні потоки, під дією яких відбувається інтенсивне перемішування пульпи.

Для отримання первинної інформації про процес осадження частинок твердої фази рудної суспензії в контрольованій зоні дешламатора пропонується метод вимірювань на основі поверхневих хвиль Лемба і високоенергетичного ультразвуку [1-5,8].

Постановка задачі. Розробка і верифікація математичної моделі взаємодії високоенергетичного ультразвуку з частками твердої фази рудної суспензії в контрольованій зоні дешламатора дозволить вирішити задачу отримання необхідної інформації про характеристики середовища, а також сформулювати оптимальні умови ведення технологічного процесу знешламлювання та підвищити якість кінцевого залізородного концентрату.

Викладення матеріалів і результатів. Використання методу вимірювань параметрів процесу осадження часток подрібненої руди в початковій його стадії на основі поверхневих хвиль Лемба і високоенергетичного ультразвуку дозволяє змоделювати процес і отримати вихідну інформацію для формування прогнозуючого керування дешламатором.

Запропонований метод реалізується за допомогою вимірювального модуля, конструкція якого може бути виконана в стаціонарному чи мобільному варіанті. Спочатку вимірювальний модуль 7 розміщується в воді (рис.1). У стінці 8 вимірювального модуля 7 за допомогою формуючої призми 1 та випромінювального п'єзоперетворювача 2 збуджуються ультразвукові поверхневі хвилі Лемба, що проходять по ній фіксовану відстань l . За допомогою формуючої призми 3 і приймального п'єзоперетворювача 4 здійснюється зворотне перетворення хвиль Лемба в електричний сигнал. У блоці обробки інформації та управління 6 визначається величина загасання інтенсивності хвиль Лемба при контакті вимірювальної поверхні 8 з водою. Ця величина далі використовується як еталонна (базова).

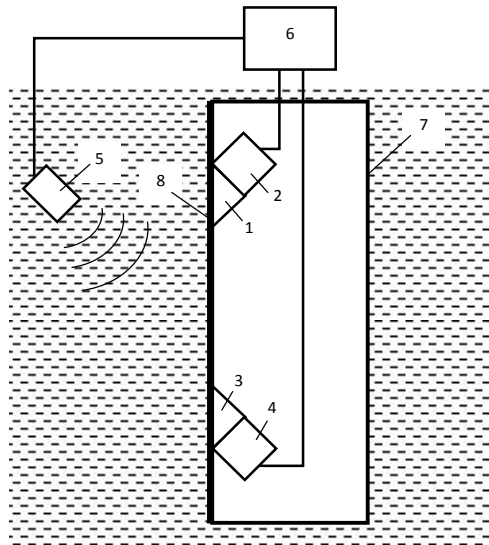


Рис. 1. Схема вимірювання змін концентрації твердої фази рудної суспензії в дешламаторі під впливом високоенергетичного ультразвуку: 1, 3 - формуючі призми; 2, 4 - п'єзоперетворювачі; 5 - джерело високоенергетичного ультразвуку; 6 - блок обробки інформації та управління; 7 - вимірювальний модуль; 8 - вимірювальна поверхня

У робочому стані вимірювальний модуль розміщується в рудній суспензії, яка знаходиться в дешламаторі. У цьому випадку коефіцієнт загасання ультразвукових хвиль Лемба, що пройшли фіксовану відстань l по стінці вимірювального модуля, визначається виразом [4,5]

$$\alpha = \left[(1 - W) \frac{\rho_B}{\rho} + W \frac{\rho_T}{\rho} \right] C_v, \quad (1)$$

де W - концентрація твердої фази в суспензії; ρ_B , ρ_T , ρ - питома вага води, часток твердої фази суспензії і матеріалу вимірювальної поверхні.

У цьому виразі величина C_v не залежить від параметрів, середовища, що контролюється, а є функцією хвильових чисел ультразвукових хвиль Лемба, поздовжніх і поперечних хвиль матеріалу вимірювальної поверхні.

Інтенсивність хвиль Лемба після проходження фіксованої відстані l по вимірювальній поверхні може бути визначена за формулою

$$I_L = I_{0L} \exp\left(-\left[(1 - W) \frac{\rho_B}{\rho} + W \frac{\rho_T}{\rho} \right] C_v l\right), \quad (2)$$

де I_L , I_{0L} - відповідно інтенсивність ультразвукових хвиль Лемба, які випромінюються, і пройшли відстань l .

Якщо вимірювальна поверхня контактує з чистою водою, то інтенсивність ультразвукових хвиль Лемба в цьому випадку

$$I_{BL} = I_{0L} \exp\left(-\frac{\rho_B}{\rho} C_v l\right). \quad (3)$$

3 (2) та (3) слідує

$$I_L = I_{BL} \exp\left(-\frac{WC_v l}{\rho}(\rho_T - \rho_B)\right), \quad (4)$$

тобто інтенсивність прийняття сигналу визначається тільки концентрацією твердої фази рудної суспензії та довжиною ділянки вимірювань l .

Відповідно до запропонованого способу обчислюється величина θ_1

$$\theta_1 = \ln \frac{I_{BL}}{I_L} = W \frac{(\rho_T - \rho_B)}{\rho} C_v l. \quad (5)$$

З цього виразу видно, що концентрація твердої фази Wv або густина контрольованого середовища на ділянці вимірювань l визначається логарифмом відношення інтенсивності ультразвукових хвиль Лемба при наявності води і рудної суспензії у вимірювальній камері, які контактують із металевою пластинною.

Параметри вимірювального каналу визначено на основі його моделювання за допомогою програмного пакету Waveform Revealer [10]. На рис. 2 наведено форму імпульсу хвиль Лемба (частота 1 МГц, вимірювальна база 500 мм, пластина з нержавіючої сталі товщиною 2 мм, питома вага матеріалу пластини 7850 кг/м^2), а на рис. 3 - основні характеристики процесу їх розповсюдження у вимірювальному каналі.

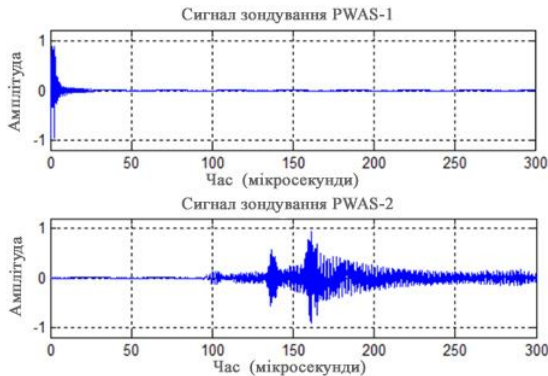


Рис. 2. Форма імпульсу хвиль Лемба у вимірювальному каналі

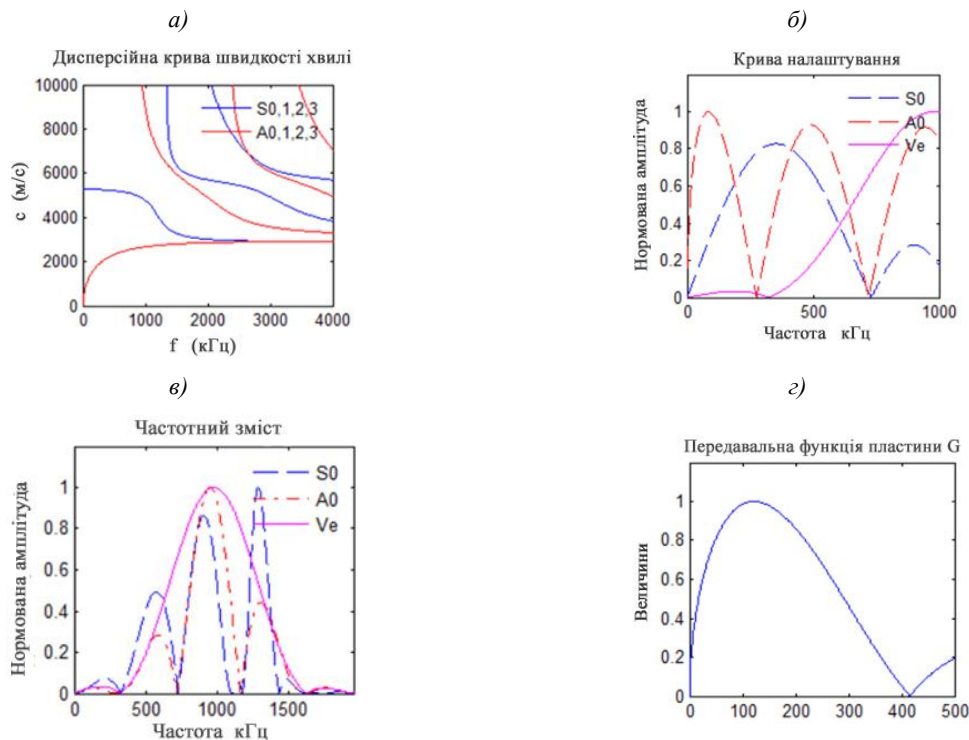


Рис. 3. Основні характеристики процесу розповсюдження хвиль Лемба у вимірювальному каналі: а - дисперсійна крива швидкості хвилі ($S_0, 1, 2, 3$; $A_0, 1, 2, 3$ – симетричні та антисиметричні моди); б - крива налаштування; в - частотний зміст хвильового пакету; г - передавальна функція структури

На рис. 2 приймальний перетворювач PWAS-1 розташований в одному місці з випромінюючим перетворювачем PWAS для оцінки впливу його конструкції на процес розповсюдження хвилі Лемба. Позиція приймального перетворювача PWAS-2 визначає вимірювальну базу.

Моделювання хвиль Лемба є складним завданням, оскільки хвилі Лемба розповсюджуються в структурах з багатомодовими дисперсійними характеристиками. При певному значенні добутку частоти на товщину пластини кілька мод Лемба можуть існувати у вимірювальному каналі одночасно і їх фазові швидкості змінюються з частотою.

На фіг.3а наведено дисперсійні криві, а на рис. 2б показано перекриття спектру збудження з настроювальними кривими симетричних S0 і антисиметричних хвиль A0. На рис. 3в показані спектри пакетів S0 і A0, що відображають зсув частоти вправо і вліво відповідно через взаємодію між спектром збудження і кривими настройки. На рис. 3г показана структура передавальної функції $G(x, \omega)$.

Під впливом радіаційного тиску джерела високоенергетичного ультразвуку 5 відбувається зміщення часток твердої фази рудної суспензії в напрямку вимірювальної поверхні 7. При цьому характер зміни концентрації часток і розподілу їх за розмірами у полі високоенергетичного ультразвуку залежить від щільності самих часток, частоти та інтенсивності впливу випромінювання [2,3,6]. Оцінимо вплив радіаційного тиску ультразвуку на зміну концентрації частинок радіуса r . Нехай у напрямку осі x тече пульпа зі швидкістю v (рис. 4). Позначимо через $n_r(z,t)$ концентрацію часток радіуса r на глибині z в момент часу t . З урахуванням аналізу, виконаного в [7,8], можна записати

$$\frac{\partial n_r(z,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} [v_r(z,t)n_r(z,t)]. \quad (6)$$

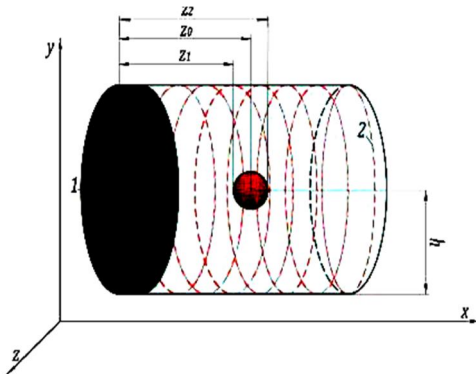


Рис. 4. Рух частки подрібненої руди у полі високоенергетичного ультразвуку

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 напрямку руху пульпи. Вважаючи, що інтенсивність ультразвукової хвилі I змінюється за експоненціальним законом (первісне значення I_0), коефіцієнт її загасання α залежить від частоти ультразвуку ν_0 та з урахуванням аналізу, виконаного в роботі [8], концентрація частинок

$n_r(z,t)$ визначається за формулою

$$n_r(z,t) = n_0 \frac{e^{\alpha z}}{e^{\alpha z} - \alpha \beta t} St(e^{\alpha z} - 1 - \alpha \beta t), \quad (7)$$

де $n_r(z,0) = n_0$, $n_r(0,t) = 0$ початкові та граничні умови;

$$St(X) = \begin{cases} 0, & X < 0 \\ 1, & X \geq 0 \end{cases}; \beta = \frac{2r(kr)^4}{27\eta c} I_0(a_1^2 + a_1 a_2 \frac{3}{4} a_2^2);$$

$$a_1 = 1 - \frac{rc^2}{\rho_T c_T^2}; a_2 = 2 \frac{\rho_T - \rho}{2\rho_T \mp \rho},$$

де ρ_T, c_T - щільність часток і швидкість ультразвуку в матеріалі часток; ρ, c - щільність досліджуваного середовища і швидкість ультразвуку у ньому.

Розрахунок потужності високоенергетичного ультразвуку, який дозволяє здійснювати прогнозоване зміщення частинок подрібненої руди певної маси в потоці пульпи здійснювався на основі отриманих вище результатів дослідження процесу поширення фронту ультразвукового імпульсу (рис.5) за допомогою пакета NIFU Simulator v1.2 [9].

У блоці обробки інформації та управління 6 обчислюється відношення величини θ_1 , отриманої без впливу високоенергетичного ультразвуку і величини з його впливом на частинки твердої фази пульпи θ_2

$$k = \frac{\theta_1}{\theta_2}. \quad (8)$$

На рис. 6 наведені результати моделювання траєкторії зміщення часток руди трьох фракцій крупності в потоці пульпи під впливом радіаційного тиску високоенергетичного ультразвуку. Положення часток кожного розміру на десятому кроці з'єднані суцільними лініями.

Розроблена програма виконує розрахунок інтенсивності високоенергетичного ультразвуку в певній точці зони вимірювань, яка дозволяє здійснювати прогнозоване зміщення часток подрібненої руди певної маси і змінення фракційного складу твердої фази рудної суспензії під керуванням впливом радіаційного тиску високоенергетичного ультразвуку. Середньоквадратична розбіжність між моделлю і експериментом в контрольних точках відповідної характеристики складала 0,87%.

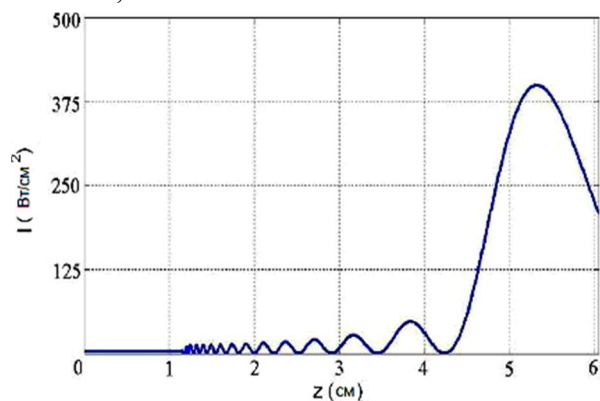


Рис. 5. Осьова інтенсивність ультразвукового випромінювання

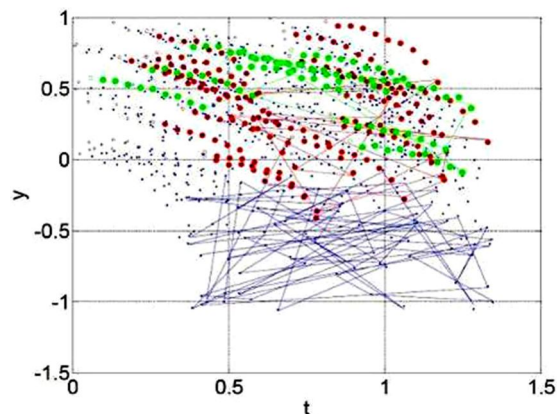


Рис.6. Результати моделювання зміщення частинок руди трьох фракцій крупності під впливом радіаційного тиску високоенергетичного ультразвуку

Висновки і напрямок подальших досліджень. На підставі аналогії між фізичним впливом радіаційного тиску високоенергетичного ультразвуку на частки твердої фази рудної суспензії і їх поведінкою в гравітаційному полі в початковій стадії процесу осадження в дешламаторі моделюються основні його параметри для формування прогноуючого керування характеристиками згущеного продукту.

Список літератури

1. **Вікторов І.А.** Звукові поверхневі хвилі в твердих тілах / І.А. Вікторов. - М.: Наука, 1981. - 287 с.
2. **Goncharov S.** Simulation and optimization of separation processes of mineral processing on basis of the dynamic effects of high-energy ultrasound, PhD diss., Krivoy Rog, 2014
3. **Podgorodetsky MS** Power effective adaptive control of the closed disintegration cycle of ore on the basis of hybrid fuzzy model, PhD diss., Kryvyi Rih, 2011.
4. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** Simulation of the Lamb waves propagation in the plate which contacts with gas containing iron ore pulp in Waveform Revealer toolbox, Metallurgical and Mining Industry, 2014, No 5, pp 16-19.
5. **Morkun, V., Morkun, N., Tron, V., Hryshchenko, S.** (2018). Study of the Lamb waves propagation along a plate in contact with a randomly inhomogeneous heterogeneous medium Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 1 (5-91), с. 18-27.
6. **Morkun, V., Tron, V., Goncharov, S.** (2015) Automation of the ore varieties recognition process in the technological process streams based on the dynamic effects of high-energy ultrasound, Metallurgical and Mining Industry, No 2, pp 31 -34.
http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_2/006Tron.pdf
7. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** (2014 року) Simulation of high-energy ultrasound propagation in heterogeneous medium using k-space method, Metallurgical and Mining Industry, No 3, pp 23-27.
<http://www.metaljournal.com.ua/assets/Archive/en/MMI3/4.pdf>
8. **Моркун В.С.** Ультразвуковий контроль характеристик подрібнених матеріалів і адаптивне управління процесами подрібнення-класифікації руд на його базі: / В.С. Моркун. - Дисс. ... докт. техн. наук: 0.5.13.07. - Кривий Ріг, 1999. - 401 с.
9. **Soneson J.** HIFU Simulator v1.2. Режим доступу: <http://www.mathworks.com/ / Matlabcentral / fileexchange / 30886-high-intensity-focused-ultrasound-simulator>.
10. **Yanfeng Shen, Victor Giurgiutiu.** Waveform Revealer: An analytical framework and predictive tool for the simulation of multi-modal guided wave propagation and interaction with damage. Structural Health Monitoring 13 (5) May 2014.

Рукопис подано до редакції 02.04.2019