

Н.В. МОРКУН, д-р техн. наук, проф. В.В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц.,
О.Ю. СЕРДЮК, асистент, А.А. ГАПОНЕНКО, науковий співробітник,
Криворізький національний університет, С.М. ГРИЩЕНКО, канд. пед. наук, ст. дослідник,
Державний податковий університет, Є.Ю. БОБРОВ, здобувач

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПУЛЬПИ У РОБОЧІЙ КАМЕРІ МАГНІТНОГО СЕПАРАТОРА НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ХВИЛЬ ЛЕМБА

Метою дослідження є розроблення методу ультразвукового контролю параметрів потоку пульпи безпосередньо у робочій камері магнітного сепаратора.

Методи дослідження. Математичний аналіз та моделювання процесу розповсюдження хвиль Лемба, що витікають з поверхні, по якій вони розповсюджуються у потік залізорудної пульпи.

Наукова новизна. Запропонований метод відрізняється від відомих тим, що для вимірювань параметрів потоку пульпи у робочій камері магнітного сепаратора застосовуються хвилі Лемба, що витікають. Це дозволяє одночасно вимірювати характеристики потоку і параметри частинок твердої фази в ньому.

Практичне значення. Метод дозволяє при наявності одного компактного вимірювального каналу (джерело, приймач) отримати відокремлену інформацію стосовно загальних характеристик пульпи і частинок її твердої фази для налаштування робочих параметрів магнітного сепаратора.

Результати. Запропонований метод ультразвукового вимірювання характеристик залізорудної пульпи в робочій камері магнітного сепаратора відрізняється від існуючих тим, що для його реалізації використовуються як хвилі Лемба, що поширюються у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і сформовані на їх основі витікаючі хвилі у контрольованому середовищі (потоці залізорудної пульпи). Це дозволяє при наявності одного компактного вимірювального каналу (джерело, приймач) отримати відокремлену інформацію стосовно загальних характеристик пульпи і частинок її твердої фази. На основі визначених числових характеристик вимірювального каналу виконано моделювання методу ультразвукових вимірювань параметрів твердої фази пульпи безпосередньо у ванні магнітного сепаратора. Моделювання та експериментальної апробації методу ультразвукового контролю параметрів пульпи у магнітному сепараторі свідчать про можливість отримання інформації про швидкість потоку у режимі реального часу з похибкою 1-1,2 %, а про концентрацію твердої фази та вміст контрольованого класу крупності подрібненої руди в ній з похибкою, яка не перевищує 1,5%.

Ключові слова: магнітний сепаратор, пульпа, ультразвук, витікаючі хвилі Лемба, параметри потоку.

doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-172-177

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Суспензії, тобто гетерогенні суміші твердих частинок у рідинах, відіграють важливу роль у різних галузях промисловості. Вбудовані методи аналізу концентрації та розміру твердих частинок у певних суспензіях представляють великий інтерес у хімії та переробній промисловості, наприклад, для моніторингу та контролю процесів седиментації у дешламаторах, вилучення корисного компоненту у магнітних сепараторах тощо.

Методи на основі ультразвуку є потужним інструментом для вирішення цього завдання, Ультразвукові хвилі поглинаються та розсіюються на твердих частинках у рідкій фазі і, на відміну від оптичних методів, дозволяють проводити вимірювання у непрозорому середовищі.

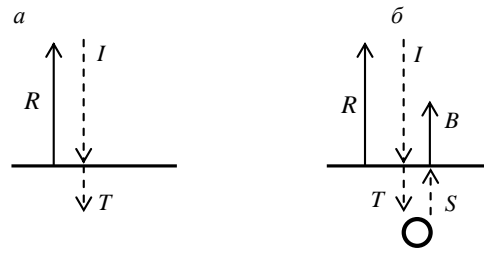
Ультразвукове дослідження широко використовується як неінвазивний метод у різноманітних застосуваннях. Їх можна додатково налаштувати за допомогою обчислювальних підходів, оскільки вони дозволяють проводити контрольоване тестування та раціональну оптимізацію параметрів ультразвуку, таких як частота та амплітуда.

Аналіз досліджень та публікацій. У роботі [1] розглянуто результати експерименту щодо визначення розміру частинок і густини суспензії за результатами ультразвукових вимірювань зворотного розсіювання на твердій поверхні розділу.

На рис. 1 наведено схему експерименту, який пояснює сутність запропонованого методу.

На рис. 1 стрілки, наведені суцільними лініями, вказують сигнали, що приймаються перетворювачем, а пунктирні стрілки - сигнали, які визначаються з використанням розрахункових коефіцієнтів відбиття і передачі.

Рис. 1. Схема експерименту: *a* - посудина з водою, в яку випромінюється ультразвук; *b* - посудина з суспензією (коло означає зворотне розсіювання ультразвуку від багатьох частинок)



Різниця фаз між сигналами I і B дорівнює різниці фаз між T і S , де T і S - сигнали, що розповсюджуються в суспензії. Було розроблено метод використання різниці фаз

між падаючим і розсіяним сигналами у досліджуваному середовищі для визначення часової затримки як функції частоти, коефіцієнта зворотного розсіювання від частоти, розподілу розмірів частинок і середнього значення їх діаметра. Зроблено висновок, що результати дослідження дозволяють розробити онлайн-датчик для вимірювання в режимі реального часу розміру частинок і щільності суспензії у трубопроводі.

У роботі [2] розглянуто акустичні сили, що діють на частинки у рідкому середовищі. Удосконалено математичну модель для опису шаруватих п'єзоелектричних резонаторів, яку застосовано для розрахунку електричних властивостей та параметрів акустичного поля резонатора. Проаналізовано ефект поділу частинок і визначено оптимальний діапазон робочих частот щодо ефективності резонатора. Встановлено, що цей показник сильно залежить від частоти та властивостей суспензії. При збудженні резонатора спостерігається значна температурна залежність резонансних частот. В основному це пов'язано з температурною залежністю швидкості звуку в рідині, що спричиняє характерний зсув резонансної частоти в діапазоні 2-3 кГц. Порівняння цього значення з шириною смуги резонансу, яка зазвичай становить менше 2 кГц, ясно показує необхідність автоматичного контролю резонансу. Результати добре узгоджуються з експериментальними даними та з іншим підходом, заснованим на теорії збурень.

Ультразвукові методи вимірювання потоку пропонують багато переваг порівняно з іншими методами вимірювання потоку, включаючи: обмежене порушення потоку, нульовий перепад тиску та широкий динамічний діапазон [3]. Однак застосування таких пристроїв зазвичай обмежується п'єзоелектричним елементом, який чутливий до пошкоджень від несприятливих властивостей середовищ, таких як, наприклад, екстремальні температури чи середовище з агресивними властивостями. Щоб усунути цю проблему, між активним п'єзоелектричним елементом і досліджуваною рідиною можна розташувати буфер. При належній конструкції цей буфер повинен ізолювати п'єзоелектрик, не впливаючи при цьому на поширення ультразвукового імпульсу, який використовується для контролю потоку. Запропонований блок перетворювача є одним із таких пристроїв, що складається з пучка тонких пластин з нержавіючої сталі з прямокутними поперечними перерізами, які поведуться як малодисперсійні хвилеводи [3].

У роботі [4] представлені результати теоретичного аналізу та моделювання витікаючих хвиль Лемба. Фактично, у хвилеводному датчику використовується випромінювання витікаючої хвилі Лемба з поверхні випромінювання на торці пластини. Однак у даній роботі не розглядається випромінювання зворотної хвилі Лемба, що витікає, відбите від торця апертури. Його вплив на основний промінь, що генерується прямою хвилею, вважається незначним через його інший кут випромінювання та зменшений енергетичний потенціал. З результатів моделювання і вимірювань пучка випромінювання, що впливає, було виявлено, що ширина моди може впливати на випромінювання витікаючої хвилі Лемба з суперпозицією мод, а характеристики випромінювання істотно змінюються залежності від фази хвилі накладених мод на поверхні випромінювання.

У випадку, коли розмір частинок набагато менший за довжину хвилі ультразвуку, як це досліджується в багатьох практичних застосуваннях, відбувається зворотне розсіювання Релея [5]. Відповідно, інтенсивність розсіяних ультразвукових хвиль пропорційна частоті у четвертому ступені, тобто явище розсіювання дуже сильно залежить від частоти. Це можна вигідно використовувати для оцінки характеристик суспензії за допомогою спектрального аналізу розсіяних хвиль (вимірювання відбиття) або хвиль, що проходять (вимірювання передачі). У роботі [5] представлено метод визначення концентрації та розміру частинок у суспензії за допомогою параметричного підходу. Це досягається шляхом підгонки аналітичної моделі до спектрів отриманих ехо-сигналів та визначення їх кількісних параметрів. Запропонована кон-

цепція була перевірена та підтверджена за допомогою експериментальних еховимірів ультразвуком у діапазоні 2 МГц. Показано, що кількісні параметри: амплітуда, центральна частота та смуга пропускання, які отримані з підібраної моделі, мають великий потенціал для оцінки розміру, а також концентрації частинок досліджуваної суспензії.

Зазвичай для моделювання ультразвуку, що поширюється крізь різні типи середовища, використовуються континуальні чисельні методи. На відміну від цього, ультразвукове моделювання з використанням опису частинок є менш поширеним, оскільки реалізація є складною. У роботі [6] використовується модель динаміки дисипативних частинок для проведення ультразвукового моделювання в рідкому середовищі. Досліджено та обговорено вплив параметрів частоти та температури. Показано, що параметри частоти та температури впливають не тільки на загасання, але й на обчислену швидкість звуку. Зроблено висновок про те, що отримані результати моделювання на основі частинок, які знаходяться в середовищі здатні відтворювати флукуаційний гідродинамічний опис ультразвуку.

Постановка завдання. У роботі [7] наведено основні принципи запропонованого методу ультразвукового вимірювання характеристик залізородної пульпи безпосередньо в робочій камері магнітного сепаратора, який відрізняється від існуючих тим, що джерело хвиль Лемба працює у режимі широкої діаграми спрямованості за V-подібною схемою, що дозволяє створити пучок когерентних хвиль, які поширюються як у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і у контрольованому середовищі (залізородній пульпі). Завданням роботи є обґрунтування та дослідження запропонованого методу з використанням теорії витікаючих хвиль Лемба.

Викладення матеріалу та результати. На рис. 2 наведено схему ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізородної пульпи у магнітному сепараторі.

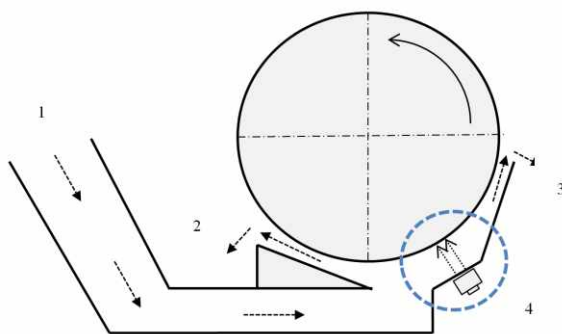


Рис. 2. Схема ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізородної пульпи у магнітному сепараторі: 1 - потік пульпи; 2 - немагнітний продукт; 3 - магнітний продукт; 4 - ультразвуковий вимірювальний канал

При розповсюдженні хвиль Лемба у пластині, яка контактує з рудною пульпою, на межі рідкого і твердого (пластини) середовищ виникають хвилі, що витікають і безперервно перевипромінюють енергію у рідину [4,7,8].

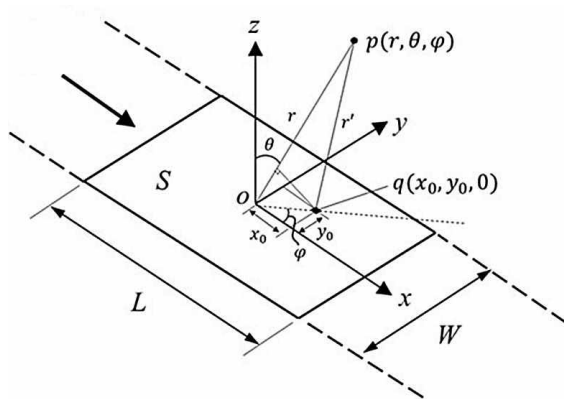


Рис. 3. Система координат площі апертури випромінювання для хвилі Лемба, що витікає [4]

Ця обставина призводить до загасання хвиль Лемба. На рис. 3 показана площа апертури випромінювання довжиною L і шириною W . Витікаюча хвиля Лемба поширюється вздовж осі $+x$ і послідовно випромінюється в навколишню пульпу ($z > 0$) з поверхні випромінювання S . Випромінювання витікаючої хвилі Лемба з відповідної поверхні обмежено $x_0 \in [-L/2, L/2]$ в нескінченній пластині в $\pm x$ напрямку [4].

Акустичний тиск у певній точці p можна визначити за допомогою інтеграла Релея-Зоммерфельда (RSI)

$$P(r, \theta, \varphi, t) = -\frac{i\rho\omega}{2\pi} \int_S v(x_0, y_0, t) \frac{e^{ik_l r'}}{r'} dS(x_0, y_0), \quad (1)$$

де ρ - густина рідини, k_l - хвильове число рідини, $v(x_0, y_0, t)$ - розподіл швидкості на апертурі, який визначається з виразу

$$v(x_0, y_0, t) = V(y_0) e^{-\alpha x_0} e^{i(k_p x_0 - \omega t)}, x_0 \in \left[\frac{L}{2}, \frac{L}{2} \right], \quad (2)$$

де α, k_p - коефіцієнт загасання і хвильове число витікаючої хвилі Лемба відповідно, $V(y_0)$ - профіль швидкості певної ширини моди у напрямку ширини.

Коефіцієнт згасання хвиль Лемба на одиниці довжини металевієї пластини (стінки робочої камери магнітного сепаратора чи вимірювального модуля) визначається за формулою [8,9]

$$k_2 = -i \frac{\rho_l}{\rho} k_1 \cdot A_{s,a}, \quad (3)$$

де ρ_l - густина рідини, що межує з поверхнею пластини; ρ - густина матеріалу пластини;

$$A_{s,a} = - \frac{ik_t^4 h S_{s,a} \cdot d}{8k_{s,a}^2 \cdot S_{s,a} \sqrt{k_c^2 - k_{s,a}^2}} \left[1 + \frac{k_{s,a}^2}{2S_{s,a}^2} + \frac{k_{s,a}^2}{2q_{s,a}^2} - \frac{4k_{s,a}^2}{k_{s,a}^2 + S_{s,a}^2} + \frac{k_{s,a}^2 \cdot d}{2S_{s,a}^2} \times \right. \\ \left. \times (thS_{s,a}d - cthS_{s,a}d) - \frac{k_{s,a}^2 \cdot d}{2q_{s,a}^2} (thq_{s,a}d - cthq_{s,a}d) \right]^{-1}, \quad (4)$$

де $k_{s,a}$ - хвильове число симетричних та антисиметричних хвиль Лемба; $q_{s,a} = \sqrt{k_{s,a}^2 - k_l^2}$; $S_{s,a} = \sqrt{k_{s,a}^2 - k_t^2}$; k_l, k_t - хвильові числа поздовжніх та поперечних хвиль матеріалу пластини.

Коефіцієнт k_2 загасання хвиль Лемба монотонно зростає при збільшенні $\rho_l \cdot \rho^{-1}$, а це означає, що k_2 можна представити у вигляді

$$k_2 = \frac{\rho_l}{\rho} C_v, \quad (5)$$

де C_v - не залежить від щільності рідини.

Залежність коефіцієнта загасання на довжину хвилі Лемба від параметрів середовища наведена на рис. 4 [8,9].

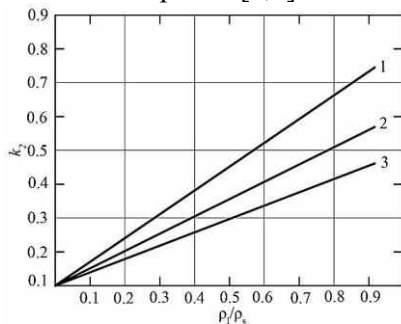


Рис. 4. Залежність коефіцієнта загасання на довжину хвилі Лемба від параметрів середовища: 1 - $C_i \cdot C_i^{-1} = 1,5$; 2 - $C_i \cdot C_i^{-1} = 2$; 3 - $C_i \cdot C_i^{-1} = 3$

На рис. 5 наведено схему вимірювання швидкості потоку пульпи у робочій камері магнітного сепаратора, яка ілюструє запропонований метод контролю.

При введенні хвиль Лемба у металеву пластину 1 (див. рис. 5) у точці 3 вони розповсюджуються по ній, а сформовані при цьому витікаючі хвилі також розповсюджуються і в потоці пульпи 2.

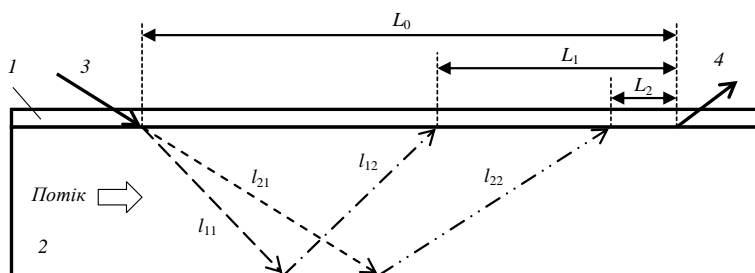


Рис. 5. Схема вимірювання швидкості потоку пульпи у робочій камері магнітного сепаратора: 1 - металевіа пластина, в якій розповсюджуються хвилі Лемба; 2 - частина робочої камери магнітного сепаратора; 3, 4 - умовні точки введення та прийому хвиль Лемба

Якщо швидкість потоку пульпи нульова, траєкторія розповсюдження ультразвукового сигналу є такою: сформовані хвилі Лемба, витікаючі хвилі у потоці пульпи на ділянці $l_{11} + l_{12}$, далі за певних умов вони знов трансформуються у металевій пластині у хвилі Лемба, розповсюджуються по частині пластини L_1 і приймаються приймальним пьезоперетворювачем у точці 4. Будь яка швидкість потоку пульпи додається до швидкості розповсюдження витікаючих хвиль, що призводить до відповідної зміни їх траєкторії: $l_{21} + l_{22} + L_2$. У часовому еквіваленті така зміна траєкторії призводить до відповідної зміни часу розповсюдження ультразвукового сигналу, що і фіксується вимірювальним пристроєм.

Як показує проведений аналіз, запропонований метод ультразвукового вимірювання характеристик залізородної пульпи безпосередньо в робочій камері магнітного сепаратора дозволяє використовувати різноманітні підходи щодо вимірювання концентрації твердої фази пульпи та крупності частинок подрібненої руди в ній. У роботі [7] було розглянуто метод вимірювання

крупності частинок твердої фази пульпи, заснований на оцінці дисперсії ультразвукового сигналу, який пройшов через контрольоване середовище. Для вирішення цієї задачі також можуть бути застосовані витікаючі хвилі Лемба.

Якщо вимірювальна поверхня (пластина) контактує з чистою водою, то інтенсивність ультразвукових хвиль Лемба в цьому випадку визначається виразом [9,10]

$$I_{nBL} = I_{0L} \exp\left(-\frac{\rho_B}{\rho} C_V l_n\right), \quad (6)$$

де I_{nL} та I_{0L} - відповідно інтенсивність ультразвукових хвиль Лемба, які випромінюються, і пройшли відстань l_n .

Відповідно до запропонованого методу обчислюється величина θ_n

$$\theta_n = \ln \frac{I_{nBL}}{I_{nL}} = W_n \frac{(\rho_T - \rho_B)}{\rho} C_V l_n, \quad (7)$$

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

Таким чином, концентрація твердої фази W_n або щільність контрольованого середовища на ділянці вимірювань l_n ($n=1,2,3$) визначається за результатами вимірювань інтенсивності хвиль Лемба за наявності води та рудної суспензії в контрольованій зоні магнітного сепаратора.

Для витікаючих високочастотних ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань скрізь потік води (на підготовчому етапі) і рудної суспензії (у робочому стані), визначається величина S_1 [11,12]

$$S_1 = \ln \frac{I_{B1}^{ob}}{\langle I_{v1}(z) \rangle}, \quad (8)$$

де I_{B1}^{ob} - інтенсивність високочастотних об'ємних ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань z скрізь потік води; $\langle I_{v1}(z) \rangle$ - інтенсивність високочастотних об'ємних ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань z скрізь потік рудної суспензії. При цьому

$$\langle I_{v1}(z) \rangle = I_{B1}^{ob} \exp\left(-\frac{Wz}{\aleph} \int_0^{r_m} \sigma(v_1, r) F(r) dr\right), \quad (9)$$

де $\aleph = \int_0^{r_m} \frac{4\pi r^3}{3} F(r) dr$; $F(r)$ - функція розподілу часток твердої фази в рудній суспензії по крупності r ; r_m - максимальний розмір часток твердої фази в рудній суспензії; $\sigma(v_1, r)$ - переріз погашення високочастотних об'ємних ультразвукових хвиль частотою v_1 на частці розміром r .

Величина S_1 залежить від крупності часток твердої фази рудної суспензії та її концентрації W

$$S_1 = \frac{Wz}{\aleph} \int_0^{r_m} \sigma(v_1, r) F(r) dr. \quad (10)$$

Відповідно величина $S = S_1 / \theta_n$ визначається тільки крупністю частинок подрібненої руди в потоці пульпи [12]. Для технологічної характеристики цього параметру використовується вміст контрольованого класу крупності частинок твердої фази пульпи.

Для практичної реалізації запропонованого методу знайдено значення фазової швидкості хвиль Лемба, що дозволило визначити параметри формуючих призм для пластин різної товщини з нержавіючої сталі марки 12X18H10T. Отримано частотні характеристики пакетів симетричних та антисиметричних мод S0,1,2,3 та A0,1,2,3 хвиль Лемба, частотні характеристики поверхні розповсюдження хвиль.

На основі визначених числових характеристик вимірювального каналу виконано моделювання методу ультразвукових вимірювань параметрів твердої фази пульпи безпосередньо у ванні магнітного сепаратора.

Практично лінійна залежність коефіцієнту загасання хвиль Лемба від характеристик середовища, яке контактує із поверхнею, по якій вони розповсюджуються, а також нечутливість цього параметру до наявності газової фази у реальній залізородній пульпі дозволяють зробити висновок щодо доцільності його застосування для реалізації запропонованого методу вимірювання концентрації твердої

фази пульпи безпосередньо у ванні магнітного сепаратора. В свою чергу це є передумовою реалізації вимірювання вмісту контрольного класу крупності твердої фази пульпи в магнітному сепараторі з похибкою, яка, відповідно до результатів проведеного аналізу, не перевищує 1,5%. Моделювання та експериментальна апробація методу ультразвукового контролю швидкості потоку пульпи із застосуванням витікаючих хвиль Лемба свідчать про можливість отримання інформації про цей параметр у режимі реального часу з похибкою 1-1,2 %.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Запропонований метод ультразвукового вимірювання характеристик залізорудної пульпи в робочій камері магнітного сепаратора відрізняється від існуючих тим, що для його реалізації використовуються як хвилі Лемба, що поширюються у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і сформовані на їх основі витікаючі хвилі у контрольованому середовищі (потоці залізорудної пульпи). Це дозволяє при наявності одного компактного вимірювального каналу (джерело, приймач) отримати відокремлену інформацію стосовно загальних характеристик пульпи і частинок її твердої фази.

Моделювання та експериментальна апробація методу ультразвукового контролю параметрів потоку пульпи із застосуванням витікаючих хвиль Лемба свідчать про можливість отримання інформації про швидкість потоку у режимі реального часу з похибкою 1-1,2 %, а про концентрацію твердої фази та вміст контрольного класу крупності подрібненої руди в ній з похибкою, яка не перевищує 1,5%.

Напрямок подальших досліджень є розробка методики використання розробленого методу вимірювань параметрів потоку пульпи безпосередньо в робочій камері магнітного сепаратора для дослідження та налаштування його характеристик.

Список літератури

1. **Greenwood M.S.** Particle size and density of a slurry from ultrasonic backscattering measurements at a solid interface. Review of Scientific Instruments. 2012. Vol. 83(9), 095101. DOI: 10.1063/1.4748520.
2. **Groschl M.** Ultrasonic separation of suspended particles - Part I: Fundamentals. Acta Acustica. 1998. Vol. 84. P. 432-447.
3. **Laws M., Ramadas S. N., Dixon S.** High temperature Studies of a Rectangular Cross-Section Waveguide for flow measurement applications center for industrial ultrasonics, department of physics. University of Warwick, Coventry, UK.
4. **Park S.-J., Kim H.-W., Joo Y.-S.** Leaky Lamb wave radiation from a waveguide plate with finite width. Applied Sciences. 2020. Vol. 10(22). 8104. DOI: 10.3390/app10228104.
5. **Vogt M., Deilmann M.** Parametric spectrum analysis of backscattered ultrasound signals for the characterization of particles in suspensions. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019. DOI 10.5162/sensoren2019/5.3.3.
6. **Papez P., Praprotnik M.** Dissipative particle dynamics simulation of ultrasound propagation through liquid water. Journal of Chemical Theory and Computation. 2022. Vol. 18. P. 1227–1240.
7. **Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В., Сердюк О.Ю., Гапоненко І.А., Гапоненко А.А.** Вимірювання параметрів процесу магнітної сепарації на основі методів ультразвукового контролю / Вісник Криворізького національного університету. 2021. - Вип. 52. С. 10-15. DOI: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-10-15.
8. **Викторов И.А.** Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука, 1981. 287 с.
9. **Morkun V., Morkun N., Tron V., Hryshchenko S.** Study of the Lamb waves propagation along a plate in contact with a randomly inhomogeneous heterogeneous medium. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1(5-91). P. 18-27.
10. **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. Vol. 5. P. 16-19.
11. **Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A.** The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp. Ultrasonics. 2015. Vol. 56. P 340–343.
12. **Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A.** Ultrasonic facilities for the ground materials characteristics control. Metallurgical and Mining Industry, 2014. - Vol. 6(2). P. 31-35.