

Список літератури

1. Дорюфеев, В.С. Повышение долговечности конструкций тонкостенных гидротехнических и транспортных сооружений / В. С. Дорюфеев, А. В. Мишутин // Вісник ОДАБА. – 2012. – №46. – С. 118-122.
2. Ключник С. Н. Вопросы теории и проектирования дисперсного армирования / С. Н. Ключник, А. В. Мишутин // Вісник ОДАБА. – 2003. – №10. – С. 87-90.
3. Мишутин А. В. Влияние дисперсного армирования полимерными фибрами и наполнителя на свойства бетона для тонкостенных конструкций / А. В. Мишутин, С. А. Кровяков, Е. А. Гапоненко // Вісник ОДАБА. – 2007. – №27. – С. 246-251.
4. Ключник С. Н. Стальные волокна для армирования бетона / С. Н. Ключник, А. В. Мишутин // Вісник ОДАБА. – 2003. – №9. – С. 101-104.
5. Давыдов С. С., Клюкин В. И., Носарев А. В. Железобетонные тонкостенные конструкции в транспортном строительстве [Электронный ресурс]. – 2022. – Режим доступа до ресурсу: <https://docplayer.com/82318881-Zhelezobetonnye-tonkostennyye-konstrukcii-v-transportnom-stroitelstve.html>.
6. Справочник по малотаннажному судостроению / Б. Г. Мордвинюв. – Л.: «Судостроение», 1987. – 576 с.
7. Бирюкович К. Л. Стеклоцемент в строительстве / К. Л. Бирюкович, Ю. Л. Бирюкович, Д. Л. Бирюкович. – К.: Будівельник, 1986. – 96 с.
8. Бирюкович К. Л. Мелкие суда из стеклоцемента и армоцемента / К. Л. Бирюкович, Ю. Л. Бирюкович, Д. Л. Бирюкович. – Л.: «Судостроение», 1965. – 164 с.
9. Лысенко Е. Ф. Армоцементные конструкции / Е. Ф. Лысенко. – К.: Высшая школа, 1974. – 208 с.
10. Качура А. А. Качественные характеристики армоцемента, полученного по ротационной технологии / А. А. Качура, Е. В. Кондращенко, Ю. А. Науменко, В. И. Кондращенко // Вісник НТУ – «ХП». – 2013. – №47. – с. 62-68.
11. ДСТУ Б В.2.6-204-2015 «Розрахунок і конструювання армоцементних конструкцій будівель та споруд» [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступа до ресурсу: https://dnaop.com/html/62242/doc-%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3_%D0%91_%D0%92.2.6-204_2015
12. Митрофанюв Е. Н. Армоцемент / Е. Н. Митрофанюв. – Л.: Стройиздат (Ленингр. отдние), 1973. – 208 с.
13. Ушерюв-Маршак А. В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы / А. В. Ушерюв-Маршак // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 8-12.
14. Ратиноу, В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратиноу, Т. И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 187 с

Рукопис подано до редакції 11.03.2022

УДК 622.7: 534

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., О. Ю. СЕРДЮК, асистент,
О. О. ГАПОНЕНКО, І. О. ГАПОНЕНКО, наукові співробітники
Криворізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ НЕЛІНІЙНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ОСАДЖЕННЯ ТВЕРДОЇ ФАЗИ ПУЛЬПИ У ДЕШЛАМАТОРІ

Метою дослідження є встановлення доцільності і розроблення методу застосування оцінювання нелінійності процесу поширення ультразвукових хвиль другого та третього порядків у пульпі, яка осаджується у дешламаторі, для оптимізації його роботи.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовано такі методи: аналіз результатів вітчизняних і зарубіжних досліджень, системний аналіз, математичне моделювання, аналітичний синтез, комп'ютерне моделювання, чисельне моделювання, комп'ютерні інформаційні технології.

Наукова новизна. В умовах змінної швидкості поширення ультразвуку та змінної густини випадково-неоднорідного середовища для моделювання даного процесу необхідно використовувати методи розширеного простору першого та вищих порядків. На основі математичного моделювання процесу поширення ультразвуку у рудній пульпі встановлено, що змінення форми імпульсу акустичних коливань кінцевої тривалості є наслідком нелінійних характеристик процесу поширення ультразвуку в пульпі, які, своєю чергою визначаються її густиною та гранулометричним складом.

Практичне значення. Запропоновано використовувати нелінійні ультразвукові вимірювання для оцінки параметрів осадження твердої фази пульпи у процесі її згущення у дешламаторі. Зазначене дозволяє враховувати коливання характеристик технологічного потоку пульпи, який подається на переробку при реалізації алгоритму змінення кількості флокулянту та продуктивності вихідного потоку згущеного продукту при керуванні процесом згущення у дешламаторі. У даному випадку змінення властивостей збагачуваної руди розглянуто як додатковий збурюючий фактор, для урахування якого здійснюють вимірювання та регулювання швидкості осадження твердої фази пульпи.

Результати. Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що оцінки нелінійності процесу поширення ультразвукових хвиль другого та третього порядків у пульпі, яка осаджується у дешламаторі, необхідно застосовувати для оптимізації його роботи. Запропонований підхід дозволяє врахувати густиною пульпи та характер розпо-

ділу часток твердої фази рудного матеріалу у дешламаторі за крупністю, встановити характеристики вихідного продукту дешламатора, та у відповідності до параметрів процесу осадження часток руди і за рахунок цього зменшити витрати води на 3,5% і втрати корисного компонента на 0,6–0,7%.

Ключові слова: дешламатор, ультразвук, автоматичне керування, моделювання, залізна руда, пульпа.

doi:10.31721/2306-5451-2022-1-54-46-50

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. У більшості процесів збагачення руди використовується значна кількість води, і кінцевий продукт – концентрат, необхідно виділяти з пульпи, в якій можливо високе співвідношення води і твердої фази. Згущення рудної пульпи здійснюють у дешламаторі, який має два продукти: густіший концентрат, який йде далі по технологічному ланцюжку, і вода, яку використовувати повторно у технологічному процесі. Для того, щоб досягти кращих результатів процесу згущення, необхідні ефективні системи управління, оскільки у згущувачі досить складно виміряти параметри перебігу технологічного процесу через значну сталу часу даного об'єкта керування.

Алгоритм керування згущувачем має враховувати коливання характеристик технологічного потоку пульпи, який подається на переробку. Це досягається за рахунок зміни кількості флокулянту та продуктивності вихідного потоку згущеного продукту. Зміну властивостей збагачуваної руди слід розглядати як додатковий збурюючий фактор, для урахування якого необхідне вимірювання та регулювання швидкості осадження твердої фази пульпи.

Аналіз досліджень та публікацій. Для поділу під дією сили тяжіння рудної пульпи на два продукти: освітлений продукт у переливному потоці та концентрований згущений продукт; використовуються дешламатори. У процесі дешламації на дні резервуару утворюється зона з вищою концентрацією твердих речовин, ніж у вхідному потоці [1-3].

Концептуальна модель ділить згущувач на п'ять шарів за концентраційним профілем. Ідея полягає в тому, що на різних шарах усередині згущувача матеріал поводить по-різному, умови змінюються, і тому рівняння для освітлення/ущільнення відрізняються [4,5].

Критерієм керування процесом згущення, як правило, є збільшення прозорості переливу (з метою досягнення мінімального вмісту у ньому твердих частинок) та збільшення густини згущеного продукту (з метою максимального вилучення твердих частинок) [6]. Поставлені цілі зазвичай досягаються за рахунок зміни швидкості випуску згущеного продукту та додавання флокулянту. Рівень осаду у даному випадку є можна змінювати регулюванням продуктивності насоса згущеного продукту, наприклад, за критерієм підтримання його сталої густини. Проміжні шари із п'яти зазначених вище можна використовувати для керування швидкістю осадження твердих частинок шляхом керування концентрацією флокулянту або витрати згущеного продукту. Оскільки границі розділу осаджуваного матеріалу використовуються для регулювання густини згущеного продукту та витрати флокулянту, недостатньо точно вимірювання цих параметрів може призвести до того, що зменшуватиметься концентрація твердого в згущеному продукті, тверді частинки потраплять у перелив або виникнуть проблеми з флокуляцією. Всі ці проблеми, у свою чергу, призведуть до додаткових витрат, пов'язаних із витратою флокулянту, або необхідності повторної дешламації.

Розроблено декілька методів вимірювання рівнів осаду та межі розділу середовищ у згущувачах [6]. Найбільш поширеними методами є такі: відбір зразків ядра вручну, вимірювання гідростатичного тиску, системи з використанням поплавця, ультразвукові вимірювання, занурювальні механічні системи.

Перспективним напрямом підвищення якості інформаційного забезпечення управління технологічними процесами на рудозбагачувальних фабриках є методи, що використовують ультразвукові вимірювання [7-9]. Використання кореляції між параметрами нелінійного ультразвуку та властивостями досліджуваного середовища запропоновано у роботі [10]. Отримані результати свідчать про те, що параметр акустичної нелінійності, розрахований за запропонованими алгоритмами, не залежить від змінних оброблення сигналу, а помилка оброблення сигналу зменшується при застосуванні вейвлет-перетворення. У роботі [11] запропоновано метод урахування впливу другої гармоніки ультразвукового сигналу при вимірюванні параметра абсолютної акустичної нелінійності з використанням методу калібрування. Експериментальні результати показують, що нелінійні параметри значно змінювалися залежно від відстані поши-

рення сигналу до запропонованої процедури компенсації, але залишалися дуже стабільними після компенсації відповідно до запропонованої методики. Параметр акустичної нелінійності використовується як ефективний індикатор, що характеризує зміну стану досліджуваного матеріалу. Однак необхідність використання монохроматичних хвиль із середньою та високою акустичною енергією накладає обмеження, що робить проблематичним їх використання у практичних цілях. У роботі [12] представлено метод експериментальних вимірювань акустичної нелінійності з використанням ультразвукових імпульсних приймачів загального призначення. Випробування підтвердили, що вимірні сигнали другого гармоніки мають лінійну залежність від потужності вхідного сигналу.

Отже, параметри ультразвукових хвиль, що розповсюджуються в пульпі, у процесі її осадження в дешламаторі доцільно використовувати для оцінки характеристик даного процесу.

Постановка завдання. Метою дослідження є встановлення доцільності і розроблення методу застосування оцінювання нелінійності процесу поширення ультразвукових хвиль другого та третього порядків у пульпі, яка осаджується у дешламаторі, для оптимізації його роботи.

Викладення матеріалу та результати. Процес згущення пульпи у дешламаторі може супроводжуватися безліччю збурюючих впливів. До таких впливів відносять: варіації обсягу вхідного продукту, зміна мінералого-технологічних різновидів перероблюваної руди, кількості, розміру, густини частинок тощо. Як зазначається у роботі [13] саме тому важливо мати можливість ефективно керувати даним процесом. Водночас, виникає завдання вимірювання всіх можливих параметрів, які впливають на процес осадження твердої фази пульпи у дешламаторі. Як було показано вище з оцінки характеристик власне процесу осадження частинок твердої фази пульпи у дешламаторі доцільно використовувати методи ультразвукових вимірювань. У суспензіях з високими концентраціями твердої фази відбувається помітна дисперсія швидкості ультразвуку, яка пов'язана з коливальною та поворотно-ізомерною релаксаціями, перебудовою внутрішньої структури рідини, з процесами дисоціації, хімічними реакціями тощо [14].

В умовах змінної швидкості поширення ультразвуку та змінної густини випадково-неоднорідного середовища для моделювання даного процесу необхідно використовувати методи розшарованого простору першого та вищих порядків. Загальні принципи, на яких ґрунтується метод розшарованого простору, представлені в роботах [15,16]. Розглянутий метод може бути розширений на випадок гетерогенного середовища. Для середовища без втрат опис процесу поширення ультразвуку має такий вигляд [15,16]

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

де u – вектор коливання швидкості акустичної частки з компонентами u_x та u_y , p – флуктуації акустичного тиску, $\rho(r)$ – густина середовища, $c(r)$ – швидкість ультразвуку у середовищі, r – вектор координат (x,y) .

Хвильове рівняння відповідно до виразу (1) має такий вигляд [15,16]

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

Розглянемо поширення синусоїдального імпульсу кінцевої тривалості у дисперсійному середовищі. Аналітично такий імпульс можна у вигляді виразу [14,17]

$$\psi(t) = \sin \omega_0 t \cdot f(t), \quad (3)$$

де $f(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \alpha' \\ 0, & t < 0, t > \alpha' \end{cases}$; ω_0 – частота синусоїдальних коливань; α' – тривалість імпульсу. Не-

зважаючи на те, що імпульс «заповнюється» певною частотою ω_0 , його тривалість є скінченною і тому цей імпульс можна представити у вигляді суперпозиції коливань з різними частотами. Вирішувати поставлене завдання доцільно за допомогою Фур'є-аналізу імпульсу. Математично Фур'є-аналіз зручніше проводити у комплексній формі. Вираз (3) у комплексній формі має вигляд

$$\psi(t) = e^{i\omega_0 t} f(t). \quad (4)$$

Зворотний перехід здійснюється шляхом виділення уявної частини виразу (4). Знайдемо перетворення Фур'є-функції

$$\phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt = \int_0^{\alpha'} e^{-i(\omega-\omega_0)t} dt = \frac{1 - e^{-i(\omega-\omega_0)\alpha'}}{i(\omega-\omega_0)} \quad (5)$$

Функція $\phi(\omega)$ визначає частотний спектр прямокутного синусоїдального імпульсу. Припустимо, що це імпульс поширюється в дисперсійному середовищі, у якому швидкість акустичних хвиль визначається функцією $c_0(\omega)$. У цьому випадку хвильову функцію рухомого імпульсу представляємо у вигляді суперпозиції гармонічних хвиль, що рухаються, з частотним спектром $\phi(\omega)$ [14,17]

$$\psi(Z, t) = \frac{1}{2\pi} \int \phi(\omega) e^{i[\omega t - k(\omega)Z]} d\omega, \quad (6)$$

де $k(\omega) = \omega/C_0(\omega)$ – хвильове число.

Розглянемо випадок, коли поширення хвиль відбувається вздовж осі Z . Виконавши підстановку виразу (5) у рівняння (6), та виконавши заміну змінною $u = \omega - \omega_0$ і увівши позначання $t' = t - Z/[C(\omega_0 + u)]$ одержимо хвильову функцію імпульсу, що розповсюджується в дисперсійному середовищі

$$\psi(Z, t) = \frac{e^{i[\omega_0 t - k(\omega_0)Z]}}{2\pi i} \int_{-\omega_0}^{\infty} \frac{e^{i(u t' + \beta)} - e^{i[u(t' - \alpha') + \beta]}}{u} du, \quad (7)$$

де $\beta = \frac{\omega_0 Z}{C_0(\omega_0)} \left[1 - \frac{C(\omega_0)}{C_0(\omega_0 + u)} \right]$.

Розглянемо зміну форми кінцевого імпульсу акустичних коливань у процесі поширення їх у дисперсійному середовищі. Позначимо:

$$u_1(t') = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\omega_0}^{\infty} \frac{e^{i(u t' + \beta)} - e^{i[u(t' - \alpha') + \beta]}}{u} du \quad (8)$$

та виділимо головне значення інтеграла по Коші, а підінтегральну експоненту представимо у формі Ейлера

$$u_1(t') = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\infty} \frac{\sin(ut' + \beta)}{u} du - \frac{i}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\infty} \frac{\cos(ut' + \beta)}{u} du. \quad (9)$$

У результаті хвильова функція (8) матиме такий вигляд

$$\psi(Z, t) = e^{i[\omega_0 t - k(\omega_0)Z]} \cdot [u_1(t') - u_1(t' - \alpha')]. \quad (10)$$

Оскільки нас цікавить тільки уявна частина виразу (10), тоді

$$\psi(Z, t) = \text{Im} \psi(Z, t) = \psi_1(Z, t) - \psi_2(Z, t), \quad (11)$$

де $\psi_1(Z, t)$ – описує передній фронт імпульсу, $\psi_2(Z, t)$ – описує задній фронт імпульсу

$$\begin{aligned} \psi_1(Z, t) &= \sin[\omega_0 t - k(\omega_0)Z] F_1(t') - \cos[\omega_0 t - k(\omega_0)Z] F_2(t'), \\ \psi_2(Z, t) &= \sin[\omega_0 t - k(\omega_0)Z] \cdot F_1(t' - \alpha') - \cos[\omega_0 t - k(\omega_0)Z] F_2(t' - \alpha'), \\ F_1(t) &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\infty} \frac{\sin(\omega t + \beta)}{u} du, \quad F_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\infty} \frac{\cos(\omega t + \beta)}{u} du. \end{aligned}$$

Як видно з виразу (11), імпульс модульований по амплітуді (амплітудна модуляція визначається функцією $F(t')$) «заповнюється» нестрого гармонічними коливаннями. У цих коливань спостерігатиметься також фазова модуляція, яка визначається параметром γ . Отже, розглянута зміна форми імпульсу акустичних коливань кінцевої тривалості є наслідком нелінійних характеристик процесу поширення ультразвуку в пульпі, які, своєю чергою визначаються її густиною та гранулометричним складом.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Отримані результати дозволяють зробити висновок про те, що оцінки нелінійності процесу поширення ультразвукових хвиль другого

та третього порядків у пульпі, яка осаджується у дешламаторі, необхідно застосовувати для оптимізації його роботи. Запропонований підхід дозволяє врахувати густину пульпи та характер розподілу часток твердої фази рудного матеріалу у дешламаторі за крупністю, встановити характеристики вихідного продукту дешламатора, та у відповідності до параметрів процесу осадження часток руди і за рахунок цього зменшити витрати води на 3,5% і втрати корисного компонента на 0,6–0,7%.

Список літератури

1. **Burger R., Diehl S., Faras S., Nopens I., Torfs E.** A consistent modelling methodology for secondary settling tanks: a reliable numerical method. *Water Science & Technology*. 2013. Vol. 68(1). P. 192-208. DOI: 10.2166/wst.2013.239.
2. **Teerikoski S.** Optimal control of clarifier-thickeners. Uppsala University, 2017. 73 p.
3. **Segovia J.P., Concha F., Sbarbaro D.** On the control of sludge level and underflow concentration in industrial thickeners. Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28-September 2, 2011. P. 8571 -8576.
4. **Christian J.B.** Improve Clarifier and Thickener Design and Operation: Using the batch ux curve method aids in optimal design and operation, *Chemical Engineering Progress*, 1994. P. 50-56.
5. **Li B., Stenstrom M. K.** Dynamic one-dimensional modeling of secondary settling tanks and design impacts of sizing decisions. *Water Research*. 2014. Vol. 50, P. 160-170.
6. **Waug N.** 5 ways to measure bed level in thickeners. URL: <https://www.plapl.com.au/5-ways-to-measure-bed-level-in-thickeners/>.
7. **Morkun V. Morkun N., Pikilnyak A.** Iron ore flotation process control and optimization using high-energy ultrasound. *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. Vol. 6. No. 2. P. 36–42.
8. **Morkun V. Morkun N., Pikilnyak A.** The gas bubble size distribution control formation in the flotation process. *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. Vol. 6. No. 4. P. 42–45.
9. **Morkun V. Morkun N., Pikilnyak A.** Modeling of ultrasonic waves propagation in inhomogeneous medium using fibered spaces method (k-space). *Metallurgical and Mining Industry*. 2014. Vol. 6. No. 2. P. 43–48.
10. **Mostavi A., Kamali N, Tehrani N., Chi S.-W., Ozevin D., Indacochea J. E.** Wavelet based harmonics decomposition of ultrasonic signal in assessment of plastic strain in aluminum. *Measurement*. 2017. Vol. 106. P. 66-78.
11. **Song D.-G., Choi S., Kim T., Jhang K.-Y.** Compensation of a second harmonic wave included in an incident ultrasonic wave for the precise measurement of the acoustic nonlinearity parameter. *Sensors*. 2021. Vol. 21. 3203. DOI: 10.3390/s21093203.
12. **Yee A., Stewart D., Bunget G., Kramer P., Farinholt K., Friedersdorf F., Pepi M., Ghoshal A.** Nonlinear ultrasonic measurements based on cross-correlation filtering techniques. *AIP Conference Proceedings* 1806. 2017. 060004. DOI: 10.1063/1.4974613.
13. Control strategies for thickeners – Rhosonics. URL: <https://rhosonics.com/news/control-strategies-for-thickeners>.
14. **Hamilton M. F., Blackstock D. T.** Nonlinear acoustics. Melville: Acoustical Society of America, 2008.
15. **Treeby B. E., Cox B. T.** k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave. *J. Biomed. Opt.* 2010. Vol. 15, No. 2. P. 021314.
16. **Treeby B. E., Jaros J., Rendell A. P., Cox B. T.** Modeling nonlinear ultrasound propagation in heterogeneous media with power law absorption using a k-space pseudospectral method. *J. Acoust. Soc. Am.* 2012. Vol. 131, No. 6, P. 4324–4336.
17. **Моркун В. С., Цокуренко А. А., Луценко И. А.** Адаптивные системы оптимального управления технологическими процессами. Кривой Рог: Минерал, 2005. 261 с.

Рукопис подано до редакції 11.03.2022

УДК 528.4

О. Є. КУЛІКОВСЬКА; д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет

ГЕОДЕЗІЯ, КАРТОГРАФІЯ І КАДАСТР У СЕРБСЬКІЙ РЕСПУБЛІЦІ

Мета. У зв'язку з появою сучасних вимог щодо забезпечення необхідною інформацією органів державної влади та органів місцевого самоврядування, зацікавлених підприємств, установ і організацій, а також громадян із метою регулювання земельних та інших відносин, визначення розміру плати за землю і цінності земель у складі природних ресурсів, контролю за використанням і охороною земель, економічного, екологічного обґрунтування бізнес-планів і господарських проєктів з'явилася мета проаналізувати практику організації геодезичних, картографічних і кадастрових робіт за кордоном на прикладі розгляду історії та сучасного стану картографо-геодезичного забезпечення, проведення кадастрових робіт на території Сербської Республіки.

Методи дослідження. Поставлена мета і завдання дослідження зумовили використання загальнонаукових підходів, логічних законів побудови висновків, спеціальних методів пізнання. При виконанні завдань дослідження спиралося на світовий досвід застосування описового методу, порівняльно-історичного методу (компаративізму), історико-типологічного методу на підставі комплексного і системного підходів. Інформаційною базою проведення