

7. Орехова О. В. Професійна захворюваність у працівників гірничо-металургійної галузі (ГМГ) України. Вісник проблем біології медицини. – 2015. – Т. 2 (125). – № 4 – С. 104-111.
8. Орехова О. В. Захворюваність працівників ГМГ за результатами періодичних медичних оглядів. Довкілля і здоров'я. – 2016. – № 2 (78). – С. 62-66.
9. Хейфіц С. Я., Балтайтис В. Я. Охрана труда и горноспасательное дело. – М.: «Недра», 1971. – С. 83-88.
10. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Лапшина Д. О. Охорона праці в гірництві. – Кривий Ріг: Вид. КНУ, 2018. – С. 95-100.
11. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 р.
12. Закон України «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення» від 24.02.1994 р.
13. ДСТУ 2867-94 «Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження».
14. ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ Шум. Общие требования безопасности».
15. ДСН 3.3.6.037-99 Оцінка постійного широкопasmового шуму.
16. Левченко О. Г., Полукаров О. І. Зацарний В. В. та ін. Охорона праці та цивільний захист. – К.: «Основа», 2019. – С. 121 – 132.
17. Бедрий Я. І. Безпека життєдіяльності. Навч. посібник. – К: Вид. «Магнолія», 2006. – С. 228-231.
18. Каспаров А. А. Гигиена труда и промышленная санитария. – М.: «Медицина», 1977. – С. 129-161.
19. Шеремет В. О., Каракаш О. І., Марунчак В. Ф. Довідковий посібник керівника та спеціаліста з охорони праці. – Дніпро: «Ліра ЛТД», 2005. – С. 267-270.

Рукопис подано до редакції 01.11.2022

УДК 622.7: 534

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,  
Криворізький національний університет,  
С. М. ГРИЩЕНКО, канд. пед. наук, ст. дослідник, Державний податковий університет,  
О. Ю. СЕРДЮК, асист., А. А. ГАПОНЕНКО, Є. Ю. БОБРОВ, аспіранти,  
Криворізький національний університет

## МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

**Метою дослідження** є обґрунтування можливості прогнозування результатів магнітної сепарації залізної руди із застосуванням ультразвукових та магнітометричних вимірювань.

**Методи дослідження.** У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного та імітаційного фізичного моделювання, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

**Наукова новизна** полягає в обґрунтуванні методу визначення феромагнітної складової у залізорудній пульпі на основі вимірювання змін параметрів розповсюдження витікаючих хвиль Лемба під дією імпульсного магнітного поля та використанні отриманих результатів для прогнозування вилучення заліза у промпродукт магнітної сепарації.

**Практичне значення** полягає в тому, що запропонований підхід дозволяє у безперервному режимі безконтактним способом отримувати інформацію стосовно основного показника якості ведення технологічного процесу магнітного збагачення залізної руди.

**Результати.** Продуктивність магнітного сепаратора та якість розділення продуктів збагачення залежать від багатьох факторів, головними з яких є його конструктивні внутрішні параметри та властивості вхідного продукту. Оскільки поки що не має технічної можливості оперативно отримувати повну інформацію стосовно всіх змінних процесу магнітної сепарації, а взаємозв'язок між ними є важкоформалізуємим, для моделювання цього процесу доцільно використовувати апарат нечіткої логіки та штучні нейронні мережі. Для практичної реалізації такого підходу у представленому дослідженні застосовується адаптивна нейро-нечітка система ANFIS. Запропонований метод ультразвукового вимірювання концентрації твердої фази пульпи, крупності її частинок, вмісту феромагнітного компоненту та швидкості потоку з застосуванням витікаючих хвиль Лемба та імпульсного магнітного поля. Результати ультразвукових вимірювань використані для формування адаптивної нейро-нечіткої моделі магнітної сепарації та прогнозування вмісту заліза у промпродукті магнітного сепаратора. Середня абсолютна помилка (*MAE*) прогнозування становила 0,64, середньоквадратична помилка (*RMSE*) - 0,45 при коефіцієнті детермінації (*R*<sup>2</sup>) - 0,93. Оскільки результати проведених досліджень сформованої моделі добре узгоджуються з експериментальними даними, зроблено висновок, що запропонований підхід можна успішно використовувати для прогнозування якості та ефективності роботи магнітних сепараторів на залізорудних збагачувальних фабриках.

**Ключові слова:** магнітний сепаратор, моделювання, витікаючі хвилі Лемба, магнітне поле, прогнозування, якість.

doi: 10.31721/2306-5451-2022-1-55-137-146

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Магнітні сепаратори широко використовуються для вилучення феромагнітного компонента з сировини, що переробляється, в багатьох галузях промислового виробництва [1,2]. Різноманітність застосовуваних при цьому конструктивних і технологічних рішень залежить головним чином від характеристик матеріалів, що розділяються. Робота типового магнітного сепаратора заснована на використанні багатьох взаємодіючих фізичних явищ, серед яких домінуючими є магнетизм, динаміка рідини, кінетика частинок та їх взаємодія [3,4]. Різноманітність цих явищ у процесі роботи магнітного сепаратора у поєднанні з труднощами вимірювання параметрів, що їх характеризують, визначають проблему оцінки ефективності поділу корисного компонента і супутньої породи в збагачуваній сировині. Одним із найважливіших показників, що характеризують технологічний процес магнітного збагачення залізняку є вміст феромагнітного компонента. Наявність інформації про цей параметр дозволяє ефективно управляти як окремими операціями (подрібнення, класифікація, сепарація, дешламація), так і всією технологічною лінією збагачення [5]. Вирішенню цієї проблеми присвячено велику кількість досліджень, але поки результати жодного з них не набули широкого практичного поширення.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Мокрі магнітні сепаратори низької інтенсивності (LIMS) є одним з пристроїв магнітної сепарації, що найбільш широко використовуються [6]. В даний час дослідження щодо LIMS зосереджені на розробці нових конструктивних рішень та високо-ефективного обладнання, методів та засобів контролю параметрів, що визначають їхню роботу, а також на вдосконаленні математичного опису та моделей процесів, які в них протікають [7,8].

Останнім часом виконано велику кількість досліджень у галузі магнітної сепарації слабо-магнітних мінералів шляхом збільшення напруженості магнітного поля та/або його градієнта. У роботі [9] описано концептуальну конструкцію та особливості нових установок, а також наведено деякі приклади їх застосування в практиці поділу корисних копалин.

У роботі [10] розглядаються основні змінні, що впливають на процес магнітної сепарації, описуються їх важливість та вплив для всіх застосувань магнітних сепараторів з мокрим барабаном. Наводяться рекомендації щодо того, як регулювати та контролювати ці змінні для досягнення оптимальної продуктивності. Зазначається, що основою оптимізації роботи магнітного сепаратора є взаємозв'язок його конструктивних параметрів, що настраюються, і характеристик сировини, що збагачується.

У ряді робіт вказується на перспективність використання при визначенні характеристик основних змінних процесу збагачення залізняку ультразвукових, магнітометричних і ядернофізичних методів вимірювань [11,12]. Так, наприклад, ультразвук використовується для визначення профілів швидкості внутрішнього потоку пульпи в магнітному сепараторі [13]. Одночасно інтенсивність сигналу зворотного розсіювання використовується для отримання відомостей про локальну концентрацію твердих частинок у потоці та накопичення магнітного матеріалу. Пропонований підхід дозволяє оцінити вплив різних факторів, що впливають на продуктивність сепаратора: швидкість подачі пульпи, концентрація твердих частинок у пульпі, кут складання магніту та швидкість обертання барабана.

У роботі [14] експериментально визначено поведінку мікрочасток карбонільного заліза у водянній камері. Певні маси цих частинок притягувалися до бічної стінки камери за допомогою зовнішнього пульсуючого магнітного поля. Досліджено залежності вимірюваного бічного тиску від маси частинок, їх розмірів та часу впливу магнітного поля. Експериментальні результати вимірювання бічного тиску показали, що аналітична модель завищує оцінні дані, проте запропонований підхід може знайти різноманітні способи застосування у різних галузях науки і техніки.

В основі сучасного високоефективного виробництва лежить широке застосування якісного математичного та програмного забезпечення як на етапі проектування, розробки конструктивних рішень, так і при експлуатації та реалізації управління технологічним процесом [15]. Розв'язання задачі оптимізації технологічного процесу починається з його моделювання і результати безпосередньо залежать від якості застосовуваної моделі. В даний час для моделювання різних процесів, що характеризуються складними внутрішніми взаємозв'язками, аналітично невизначеними залежностями «вхід-вихід» з неповним та нечітким інформаційним забезпеченням знайшли поширення нейро-нечіткі системи [16]. Однією з найпоширеніших таких систем є ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system). Це структура, що реалізує механізм логічного

висновку Такагі-Сугено-Канга. У роботі [17] відзначаються її переваги перед багатошаровим перцептроном, «чистими» нечіткими системами та рядом подібних.

Відомо про різноманітні способи використання таких систем. Наприклад, у роботі [18] розглядається метод оптимізації процесу відновлення сапролітових рудних композитів з використанням штучної нейронної мережі (ANN) та рентгенівської різницевої флуоресценції (XRF). Для операторів трубопроводів у нафтовій промисловості важливо постійно контролювати характеристики середовища, що перекачується, такі як її тип і кількість. Для досягнення цієї мети в дослідженні [19] пропонується використовувати двоенергетичний денситометр у поєднанні зі штучною нейронною мережею (ANN), що дозволяє одночасно визначати тип та кількість чотирьох різних продуктів нафтопереробки. У дослідженні [20] наводяться результати прогнозування вертикальної напруги у реальному профілі ґрунту, створеного колесом, з використанням ANFIS. У роботі [21] описується автономний контролер польоту БПЛА (безпілотних літальних апаратів) на основі ANFIS. Для управління положенням БПЛА у тривимірному просторі за висотою та широтою-довготою розроблено три модулі нечіткої логіки. Вони регулюють кут тангажу, кут крену та положення дросельної заслінки двигуна БПЛА. ANFIS застосовується для побудови системи прогнозування рівня води у паводкові періоди [22]. Оскільки кількість вхідних змінних у цьому випадку досить велика (17-18), використаний метод субтрактивної нечіткої кластеризації, який автоматично визначає кількість кластерів. Результати показують, що ANFIS забезпечує високу точність та надійність прогнозування рівня води у водосховищі на найближчі три години. В роботі [23] вивчалися механічні властивості легкого конструкційного бетону, що містить керамзитобетон та різну кількість базальтових волокон (0-0,5 %). У цьому дослідженні ANFIS використовується для прогнозування емпіричних результатів як надійний метод аналізу та оцінки.

Нечітка логіка та штучні нейронні мережі широко застосовуються при вирішенні завдань моделювання, контролю та управління в галузі збагачення корисних копалин. В роботі [24] наводяться результати оптимізації режимних параметрів технологічних процесів збагачення залізняку на основі формування цільової функції із застосуванням багатошарових нейронних мереж. У роботі [25] ANFIS-модель використовується для реалізації автоматизованого керування замкнутим циклом подрібнення руди, а в дослідженні [26] - при формуванні оптимального керування температурним режимом випалювання котунів.

Таким чином, в даний час дослідження в галузі магнітної сепарації перероблюваної руди зосереджені на розробці нових конструктивних рішень та високоефективного обладнання, методів та засобів контролю параметрів, що визначають її ефективність. Важливим елементом цих досліджень є вдосконалення математичного опису та моделей магнітного сепаратора, що дозволяють прогнозувати результати його роботи.

**Постановка завдання:** дослідження методу визначення феромагнітної складової у залізорудній пульпі на основі вимірювання змін параметрів розповсюдження ультразвукових витікаючих хвиль Лемба під дією імпульсного магнітного поля та обґрунтування використання отриманих результатів для прогнозування вмісту заліза у промпродукті магнітної сепарації із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої моделі.

**Викладення матеріалу і результати.** Ефективність роботи та якість розділення продуктів збагачення у магнітному сепараторі залежать від багатьох факторів, головними з яких є його конструктивні внутрішні параметри (рівень пульпи у робочій камері, зазор між барабаном та дном робочої камери, характеристики і розташування магнітної системи, рівень вивантажування магнітного продукту) та властивості вхідного продукту (вміст феромагнітного компоненту, щільність та швидкість потоку пульпи, крупність частинок подрібненої руди) [2,10]. Оскільки поки що не має технічної можливості оперативно отримати повну інформацію стосовно всіх змінних процесу магнітної сепарації, а взаємозв'язок між ними є важкоформалізуємым, для моделювання цього процесу доцільно використовувати апарат нечіткої логіки та штучні нейронні мережі.

Для практичної реалізації такого підходу зручно використовувати ANFIS – редактор програмного пакету Matlab 2017. На рис. 1 наведено базу правил моделі TS0914, що визначає залежність вмісту заліза у вихідному продукті магнітної сепарації першої стадії збагачення 9 секції Північного гірничо-збагачувального комбінату від характеристик вхідного продукту (злив класифікатора, що працює у замкненому циклі із кульовим млином) за даними випробувань

Хміль І.В. [27]. Прийнято такі позначення: in1 – концентрація твердої фази пульпи у вхідному продукті, in2 – вміст Fe у вхідному продукті, in3 - вміст класу -56 мкм у вхідному продукті, out1 – вміст Fe у вихідному продукті магнітної сепарації.

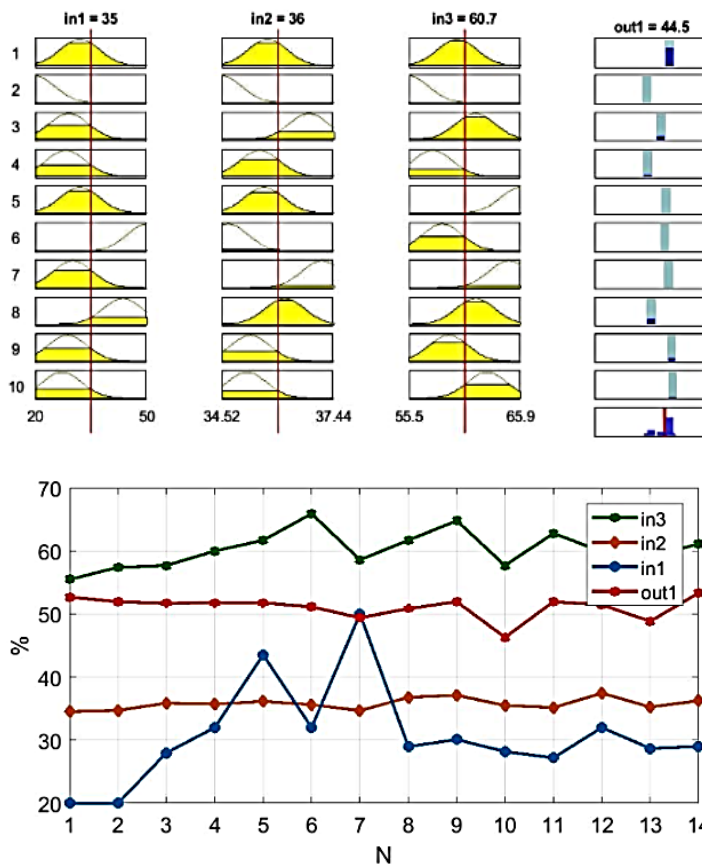


Рис.1. База правил ANFIS моделі TS0914

На рис.2 наведено масиви даних, які використані при формуванні моделі TS0914 (середні значення 14 циклів випробувань). В процесі випробувань навантаження на відповідну технологічну секцію змінювалось від 101 до 114 т/год, а вміст класу +20 у вхідному продукті млина, відповідно, від 6,1 до 7,8 %. Наведена інформація характеризує значний діапазон варіацій технологічних змінних під час випробувань.

Рис. 2. Масиви даних, які використані при формуванні залежності вмісту Fe у промпродукті магнітної сепарації від характеристик вхідного продукту

Результати застосування нейронечіткого підходу для моделювання технологічних операцій збагачення залізної руди (середня абсолютна похибка сформованої моделі становила 0,36%) дозволяють зробити висновок стосовно доцільності його використання при розробленні мето-

тоду прогнозування вмісту заліза у промпродукті магнітної сепарації на основі ультразвукових та магнітометричних вимірювань параметрів вхідного продукту.

Для отримання інформації щодо характеристик вхідного продукту магнітного сепаратора пропонується метод, заснований на використанні вимірювання змін параметрів розповсюдження витікаючих хвиль Лемба під дією імпульсного магнітного поля.

При розповсюдженні ультразвукових хвиль Лемба в металевій пластині, що контактує із залізорудною пульпою, частина їх енергії випромінюється (витікає) в оточуюче середовище і відповідним чином трансформується в об'ємні ультразвукові хвилі, які далі розповсюджуються у пульпі. За рахунок цих процесів змінюються характеристики як хвилі Лемба, що продовжують розповсюджуватися по металевій пластині, так і об'ємних ультразвукових хвиль в потоці пульпи.

В роботах [28-30] запропоновано використовувати напіваналітичний метод кінцевих елементів SAFE для моделювання цього процесу. Метод SAFE будує двовимірну модель кінцевих елементів (FE) для поперечного перерізу об'єкта аналізу, а потім до побудованої моделі FE застосовується аналітичне рішення розповсюдження хвилі. Рівняння побудованої системи FE без зовнішнього навантаження можна записати таким чином

$$:\{\gamma^2 \mathbf{K}_2 + i\gamma \mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_0 + \omega^2 \mathbf{M}\} \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

де  $\mathbf{K}_2$ ,  $\mathbf{K}_1$  і  $\mathbf{K}_0$  - матриці жорсткості;  $\mathbf{M}$  - матриця мас поперечного перерізу..

Вектор зміщення  $\mathbf{u}$  визначається наступним чином

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}(\mathbf{y}, z) e^{i(\gamma x - \omega t)}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{U}$  означає функції переміщень поперечного перерізу.

З рівняння (2) хвильове число  $\gamma$  може бути визначено для кожної частоти  $\omega$ , а дисперсійні криві можуть бути побудовані в діапазоні частот, що цікавить. Для реалізації методу SAFE зручно використати програмний пакет FEM [29,30].

Тривимірний профіль хвилі можна аналізувати у двох незалежних площинах: вертикальній та поперечній. На рис. 3 представлені діаграми спрямованості та профілі пучка витікаючої моди  $A(0,0)$  хвилі Лемба:  $a$  - вертикальний профіль пучка і  $b$  - бічний профіль пучка [28].

**Рис. 3.** Діаграми спрямованості та профілі пучка витікаючої моди  $A(0,0)$  хвилі Лемба:  $a$  – вертикальний профіль пучка,  $b$  – бічний профіль пучка

Особливості розповсюдження витікаючих хвиль Лемба використані при розробленні одноканального методу ультразвукового вимірювання концентрації твердої фази, вмісту контрольного класу крупності частинок твердої фази в залізорудній пульпі та швидкості її потоку [31].

Для визначення концентрації твердої фази пульпи обчислюється величина  $S_1$

$$S_1 = \ln \frac{I_{lwL}}{I_{LL}} = W_n \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho} C_v l, \quad (3)$$

де  $W$  - концентрація твердої фази в пульпі;  $\rho_w$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho$  - питома вага води, часток твердої фази пульпи і матеріалу вимірювальної пластини;  $C_v$  - параметр, який визначається конструкцією вимірювального каналу;  $I_{lwL}$  та  $I_{LL}$  інтенсивність хвиль Лемба при контакті вимірювальної пластини з чистою водою (на підготовчому етапі) і пульпою (у робочому стані) на ділянках вимірювань  $l$ .

Для визначення вмісту контрольного класу крупності частинок твердої фази в залізорудній пульпі для витікаючих високочастотних ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань скрізь потік води (на підготовчому етапі) і рудної суспензії (у робочому стані), визначається величина  $S$

$$S = S_2 / S_1; \quad (4)$$

$$S_2 = \ln \frac{I_{zw}}{I_z} = \frac{Wz}{\vartheta} \int_0^{r_m} \sigma(v_1, r) F(r) dr; \quad (5)$$

$$\vartheta = \int_0^{r_m} \frac{4\pi r^3}{3} F(r) dr, \quad (6)$$

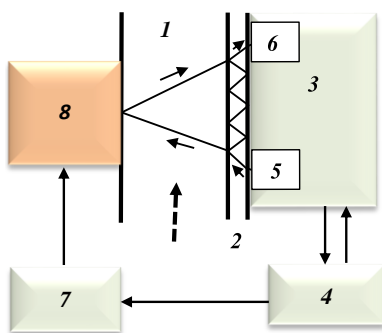
де  $I_{zw}$  - інтенсивність високочастотних об'ємних витікаючих ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань  $z$  скрізь потік води;  $I_z$  - інтенсивність високочастотних об'ємних витікаючих ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань  $z$  скрізь потік залізорудної пульпи;  $F(r)$  - функція розподілу часток твердої фази в рудній пульпі по крупності  $r$ ;  $r_m$  - максимальний розмір часток твердої фази в рудній пульпі;  $\sigma(v_1, r)$  - переріз погашення високочастотних об'ємних ультразвукових хвиль частотою  $v_1$  на частці розміром  $r$ .

Для вимірювання швидкості  $v_h$  потоку пульпи визначається різниця часу розповсюдження високочастотних об'ємних витікаючих ультразвукових хвиль у досліджуваному середовищі у спокійному стані та в процесі його переміщення. Будь яка швидкість потоку пульпи додається до швидкості розповсюдження витікаючих хвиль, що призводить до відповідної зміни їх траєкторії, а у часовому еквіваленті така зміна траєкторії призводить до відповідної зміни часу розповсюдження ультразвукового сигналу, що і фіксується вимірювальним пристроєм.

Зазначений підхід пропонується використовувати також для оцінки вмісту феромагнітного компонента в пульпі. На рис. 4 наведено загальну схему вимірювання, яка реалізує цей метод.

Потік пульпи переносить частинки подрібненої руди у магнітне поле сепаратора, яке формується вузлом з постійними магнітами. Цей процес у робочому резервуарі магнітного сепаратора змодельовано у вимірювальному каналі 1, де формується потік пульпи, яка контактує з металевою пластинною 2. Вимірювальний пристрій 3 по сигналу з комп'ютера 4 формує за допомогою випромінюючого перетворювача 5 у металевій платині 2 хвилі Лемба. Частково вони випромінюються у потік пульпи і перетворюються у об'ємні ультразвукові хвилі. Приймальний перетворювач 6 виконує зворотне перетворення і отриманий таким чином сигнал пос-

тупає у вимірювальний пристрій 3. Після часової селекції та первинного оброблення інформація зчитується комп'ютером 4, де і визначаються основні характеристики досліджуваного середовища. У зазначений час по сигналу з комп'ютера 4 програмований формувач 7 генерує імпульс, який у обмотці із сердечником магнітного блока 8 утворює імпульсне магнітне поле, що впливає на пульпу у вимірювальному каналі 1. Таким чином визначаються характеристики потоку пульпи у період дії магнітного поля та без нього.



**Рис. 4.** Схема реалізації методу вимірювань: 1 - вимірювальний канал; 2 - металева пластина; 3 - вимірювальний пристрій; 4 - комп'ютер; 5 - випромінюючий перетворювач; 6 - приймальний перетворювач; 7 - програмований формувач; 8 - магнітний блок

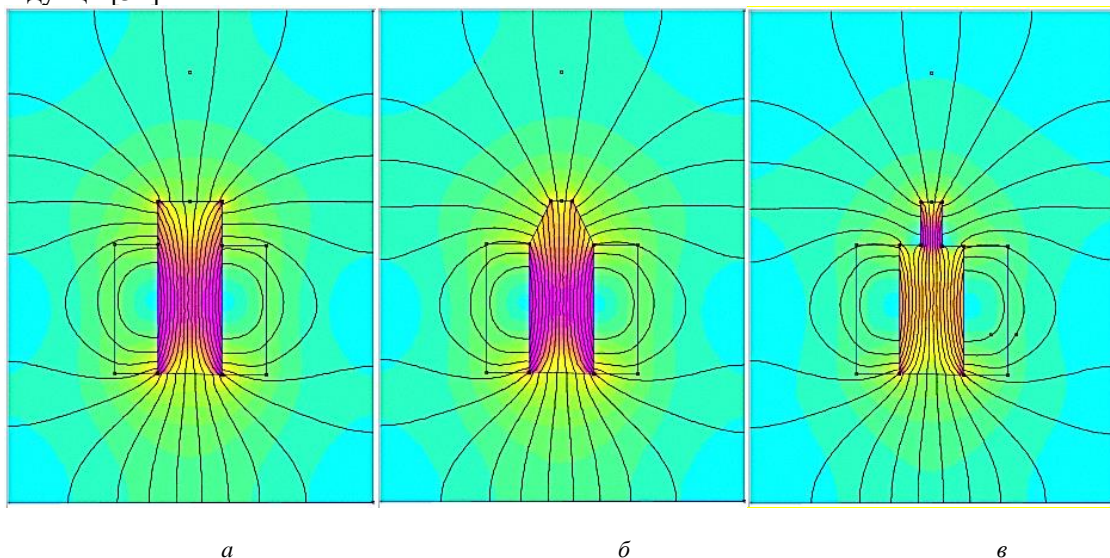
Магнітна сила, що діє у вимірювальному каналі на частинку радіусу  $r_{mix}$ , може бути розрахована за формулою [32]

$$F_m = 2\pi r_{mix}^3 \mu_0 \mu_r K \nabla H^2, \quad (7)$$

де  $\mu_r$  - відносна магнітна проникність води;  $\mu_0$  - відносна магнітна проникність вакууму;  $\rho_{mix}$  - щільність частинок подрібненої руди;  $H$  - напруженість магнітного поля;  $K$  - коефіцієнт Клаузіуса-Мосоті

$$K = \frac{\mu_{r_{mix}} - \mu_r}{\mu_{r_{mix}} - 2\mu_r}. \quad (8)$$

Напруженість або індукція магнітного поля у вимірювальному каналі залежить від характеристик електромагніту та періоду його робочого часу. Магнітний блок (рис. 3) являє собою електромагніт, що складається з котушки та металевого сердечника. Сердечник виконаний із пермендіюру з низькою коерцитивною силою. Котушка містить 550 витків мідного дроту діаметром 0,8 мм. Магнітний блок формує імпульсне магнітне поле зі шпаруватістю 8. Така характеристика імпульсної послідовності необхідна для того, щоб не допустити впливу залишкової намагніченості сердечника на результати вимірювань. Магнітне поле, створюване магнітним блоком, моделювалася за допомогою програмного пакета Femm [33]. На рис. 5 показані результати моделювання магнітного поля, створюваного електромагнітом, сердечник якого має різну конфігурацію. Вибрана форма (в, рис. 6) сердечника дозволяє сфокусувати лінії струму магнітної індукції [34].



**Рис. 5.** Результати моделювання магнітного поля, створюваного магнітним блоком: а - циліндричний сердечник; б - конусоподібний сердечник; в - сердечник із «наконечником»

У процесі досліджень використаного методу вимірювань застосовувалася магнітна система з наступними характеристиками: струм у котушці -10 А; падіння напруги на котушці - 2.65898 В; поточозчеплення = 0.0234199 Вб; індуктивність котушки - 0.00234199 Ге; комплексний опір котушки - 0.265898 Ом; електрична потужність електромагніта - 26.5898 Вт.

На рис. 6 наведена залежність величини магнітної індукції В від відстані  $l$  до сердечника електромагніту у вимірювальному каналі.

**Рис. 6.** Залежність величини магнітної індукції  $B$  від відстані  $l$  до сердечника електромагніту

Поведінка частинок подрібненої руди розміром  $r_{mix}$  у вимірювальному каналі розглядається з урахуванням гідродинамічної сили опору  $F_D$  [32]

$$F_D = \frac{18\mu_w}{\rho_{mix}r_{mix}^2} m_{mix}(\vec{u} - \vec{v}_{mix}), \quad (9)$$

де  $\mu_w$  – динамічна в'язкість води, а  $m_{mix}$  – маса частинок подрібненої руди.

Частинки подрібненої руди надходять у вимірювальний канал при дії сили опору, починають розділятися під дією магнітних сил і рухаються в напрямку знаходження магнітного пристрою впродовж часу дії магнітного поля.

Рівняння руху частинки у вертикальному напрямку можна записати таки чином

$$dv_v/dt = f_m - f_g - f_D, \quad (10)$$

де  $f_m, f_g, f_D$  – питома магнітна сила, питома сили тяжіння, питома сила гідродинамічного опору.

Рішення диференціального рівняння дає формулу для розрахунку переміщення частинки у вертикальному напрямку [5]

$$y_t = \frac{a}{b} \left( t + \frac{e^{-tb}}{b} \right) - \frac{a}{b^2}, \quad (11)$$

де  $t$  – поточний час;  $y_t$  – поточна координата частинки;  $a = f_m - f_g$ ;  $b = 18\mu/(\rho_{mix} \cdot r_{mix}^2)$ .

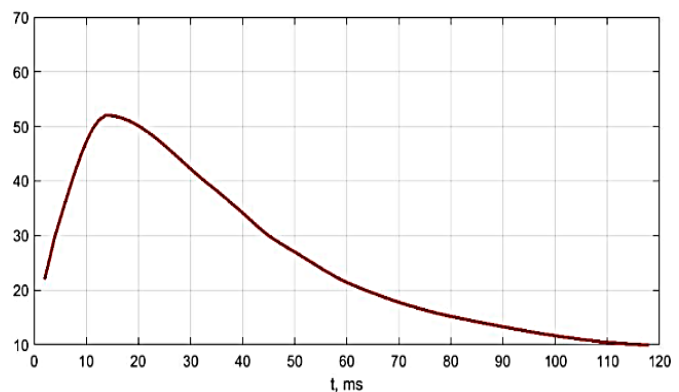
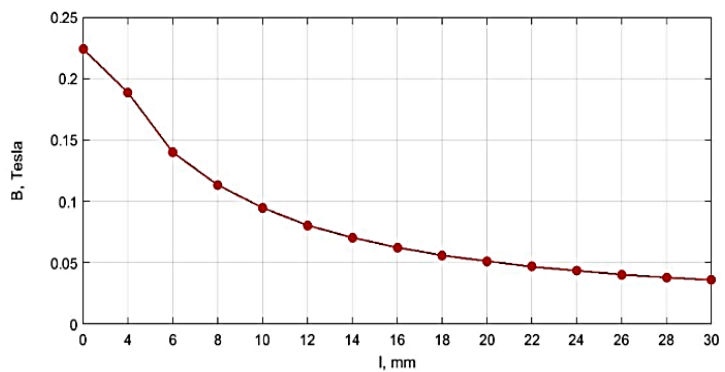
Розроблено алгоритм та комп'ютерну програму моделювання руху частинок подрібненої руди при дії на них наведених вище сил і, відповідно, змін характеристик пульпи, що визначаються за допомогою вимірювання параметрів витікаючих хвиль Лемба:  $S, S_1, S_2$  та  $v_v$ .

На рис.7, як приклад, наведено результати моделювання зміни під впливом магнітного поля сигналу  $S_2$  (5) для випадку, коли у вимірювальний канал надходить магнетитова пульпа, що містить мінеральні зростки з вмістом Fe – 52,6%, питомою магнітною сприйнятливістю –  $5,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$ , і щільністю –  $4000 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

**Рис. 7.** Зміна сигналу  $S_2$  (від. од.) під впливом імпульсного магнітного поля

Інформація, одержувана на підставі результатів ультразвукових вимірювань, щодо зміни під дією імпульсного магнітного поля щільності пульпи (концентрації твердої фази), крупності частинок подрібненої руди (вмісту контрольного класу крупності) та швидкості потоку дозволяє спрогнозувати процес поділу рудного матеріалу в магнітному сепараторі та оцінити його ефективність.

Отримані результати використані при прогнозуванні результатів магнітної сепарації (вміст Fe у вихідному промпродукті – сигнал out1) магнетитових кварцитів за допомогою програмного пакету ANFIS. Сформована FIS структура із п'ятьма входами: 1 - сигнал  $S_1$  (in1); 2 - зміна сигналу  $\Delta S_1$  при дії магнітного поля (in2); 3 - сигнал  $S$  (in3); 4 - зміна сигналу  $\Delta S$  при дії магнітного поля (in4); 5 - вимірне значення швидкості потоку пульпи  $v_h$  (in5). При формуванні бази правил моделі найкращі результати показали *гаусівські* функції належності. У процесі навчання моделі були протестовані як гібридний метод, так і метод зворотного поширення помилки. За результатами проведеного аналізу було обрано гібридний метод. Для навчання фінального варіанта моделі виявилось достатньо 10 епох. Сформована ANFIS модель має такі характеристи-



ки: кількість вузлів – 176; кількість лінійних параметрів – 84; кількість нелінійних параметрів – 140; загальна кількість параметрів – 224; кількість нечітких правил – 14.

На рис. 8 наведено структуру моделі, а на рис. 9 – сформовану поверхню залежності по одному із каналів (залежність вмісту Fe у вихідному промпродукті (out1) від сигналу  $S$  (in3) та виміряного значення швидкості потоку пульпи  $v_h$  (in5)).

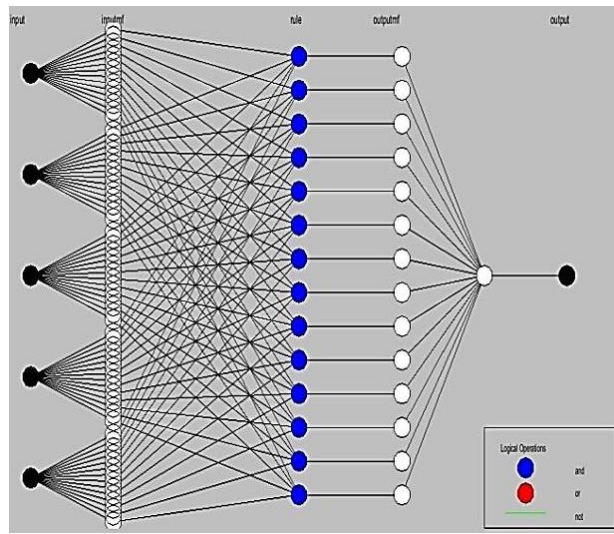


Рис. 8. Структура ANFIS моделі

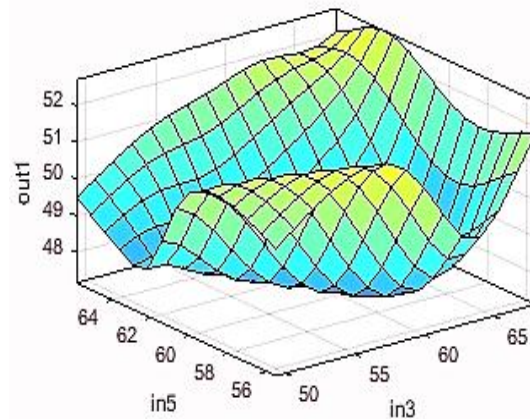


Рис. 9. Сформована поверхня залежності вмісту Fe у вихідному промпродукті магнітного сепаратора (out1) від виміряних значень  $S$  (in3) та швидкості потоку пульпи  $v_h$  (in5)

Середня абсолютна помилка (MAE) прогнозування становила 0,64, середньоквадратична помилка (RMSE) - 0,45 при коефіцієнті детермінації ( $R^2$ ) - 0,93.

Отримані результати показують, що запропонований метод прогнозування якості продуктів процесу магнітної сепарації залізняку на основі моделювання оцінки впливу прикладеного імпульсного магнітного поля на результати ультразвукових вимірювань характеристик потоку пульпи може бути ефективно використаний для оптимізації технологічних збагачення.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Запропонований метод ультразвукового вимірювання концентрації твердої фази пульпи, крупності її частинок, вмісту феромагнітного компоненту та швидкості потоку з застосуванням витікаючих хвиль Лемба та імпульсного магнітного поля. Результати ультразвукових вимірювань використані для формування адаптивної нейро-нечіткої моделі магнітної сепарації у програмному пакеті ANFIS. Оскільки результати проведених досліджень сформованої моделі добре узгоджуються з експериментальними даними, зроблено висновок, що запропонований підхід можна успішно використовувати для прогнозування якості та ефективності роботи магнітних сепараторів на залізрудних збагачувальних фабриках.

Напрямом подальших досліджень слід вважати удосконалення бази даних, які використовуються для навчання ANFIS моделі та використання більш ефективних методів її оптимізації.

#### Список літератури

1. Feiwang Wang, Shitao Zhang, Zhiqiang Zhao, Likun Gao, Xiong Tong, Huixin Dai. Investigation of the magnetic separation performance of a low-intensity magnetic separator embedded with auxiliary permanent magnets. - Minerals Engineering, Volume 178, 15 March 2022, 107399. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107399>.
2. Білецький В. С., Олійник Т. А., Смирнов В. О., Скляр Л. В. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин. - К.: Ліра-К 2020. - 634 с.
3. Z. Yuan et al. Effect of selective coating of magnetite on improving magnetic separation of ilmenite from titan augite. - Miner. Eng. (2020).
4. J.F. Stener et al. Internal flow measurements in pilot scale wet low-intensity magnetic separation. - Int. J. Miner. Process. (2016).
5. Пелевін А.Е. Магнітні та електричні методи збагачення. Магнітні методи збагачення. – УГГУ, 2018. – 296 с.
6. P. Straka et al. Linear structures of Nd-Fe-B magnets: Simulation, design and implementation in mineral processing – A review Miner. Eng. (2019).
7. J.G. Rayner et al. A mathematical model of concentrate solids content for the wet drum magnetic separator. - Int. J. Miner. Process. (2003).



8. **F. Wang et al.** Design optimization and manufacturing of an innovative precise low-intensity magnetic separator based on a multiphysics model. - *Miner. Eng.* (2021).
9. **H.-D. Wasmuth, K.-H. Unkelbach.** Recent developments in magnetic separation of feebly magnetic minerals. - *Minerals Engineering*, Volume 4, Issues 7–11, 1991, Pages 825-837. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90068-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90068-7).
10. **M. Dworzanowski.** Optimizing the performance of wet drum magnetic separators. - *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2010, VOLUME 110, 643-653 p.p.
11. **Азарян А.А., Азарян В.А., Моркун В.С.** Оперативний контроль якості руд чорних металів з використанням гамма-випромінювання // Гірничий вісник. – Кривий Ріг, 2022. Вип. 110. С. 13-22.
12. **Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Сердюк О. Ю., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А.** Формування інформаційної бази для управління процесом осадження часток твердої фази рудної пульпи у дешламаторі // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2021. Вип. 53. С. 53-57.
13. **F. Stener Johan, E. Carlson Bertil, I. Pålsson Anders Sand.** Direct measurement of internal material flow in a bench scale wet low-intensity magnetic separator. - *Minerals Engineering*, Volume 91, 15 May 2016, Pages 55-65. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.10.021>.
14. **Werner O, Azulay A, Mikhailovich B, Levy A.** Experimental Study of Sidewall Pressure Induced by Ferroparticles in Fluid under a Pulsating Magnetic Field. *Fluids*. 2020; 5(2):98. <https://doi.org/10.3390/fluids5020098>.
15. **Seyed Ahmad Hashemi, Bahram Rezaei, Mohammad Reza Tavakoli Mohammadi, Sepiden Javanshir.** Characterization and concentration studies of Jalal Abad iron mine. - *Arch. Min. Sci.*, Vol. 58 (2013), No 3, p. 729–745. DOI 10.2478/amsc-2013-0051.
16. Viharos, Zs. J.; Kis K. B.: Survey on Neuro-Fuzzy Systems and their Applications in Technical Diagnostics and Measurement, *Measurement*, Vol. 67., 2015., pp. 126-136., (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.001>),
17. Viharos, Zs. J.; Kis K. B.: Survey on Neuro-Fuzzy Systems and their Applications in Technical Diagnostics and Measurement, *Measurement*, Vol. 67., 2015., pp. 126-136., (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.02.001>),
18. **Angella Natalia Ghea Puspitaa, Isti Surjandaria, Zulkarnaina, Adji Kawigrahah, Nur Vita Permatasarib.** Optimization of Saprolite Ore Composites Reduction Process Using Artificial Neural Network (ANN). The Fifth Information Systems International Conference 2019, *Procedia Computer Science*, 161 (2019), 424–432.
19. **Mohammadmehdi Roshani, Giang Phan, Rezhna Hassan Faraj, Nhut-Huan Phan, Gholam Hossein Roshani, Behrooz Nazemi, Enrico Corniani, Ehsan Nazemi.** Proposing a gamma radiation based intelligent system for simultaneous analyzing and detecting type and amount of petroleum by-products. - *Nuclear Engineering and Technology* 53 (2021) 1277-1283.
20. **Hamid TaghaviFar, Aref Mardani.** Prognostication of vertical stress transmission in soil profile by adaptive neuro-fuzzy inference system based modeling approach. - *Measurement*, Volume 50, April 2014, Pages 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.12.035>.
21. **Sefer Kurnaz, Omer Cetin, Okyay Kaynak.** Adaptive neuro-fuzzy inference system based autonomous flight control of unmanned air vehicles. *Expert Systems with Applications*. - Volume 37, Issue 2, March 2010, Pages 1229-1234. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.06.009>.
22. **Fi-John Chang, Ya-Ting Chang.** Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir *Advances in Water Resources*, Volume 29, Issue 1, January 2006, Pages 1-10.
23. **Ashkan Saradar, Parisa Nemat, Ali Shadman iPaskiabi, Mohammad Mohtasham Moein, Hossein Moez, Elaheh Hassanzadeh Vishki.** Prediction of mechanical properties of lightweight basalt fiber reinforced concrete containing silica fume and fly ash: Experimental and numerical assessment. – *Journal of Building Engineering*, Volume 32, November 2020, 101732. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101732>.
24. **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. - *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, 6(4), pp. 51–55.
25. **В. С. Моркун, Н. В. Моркун, М. С. Подгородецкий, А. В. Пікільняк.** Ініціалізація гібридної нечіткої моделі замкнутого циклу подрібнення руди / Вісник КТУ. - Кривий Ріг: КТУ. - Вип. 26, 2010. - С. 290-293.
26. **С. А. Рубан, В. І. Лобов.** Комп'ютерне моделювання алгоритму оптимального керування температурним режимом випалювання когунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей. – Вісник КТУ: зб. наук. праць ..., 2008.
27. **Хміль І. В.** Особливості технології подрібнення магнетитових кварцитів в умовах об'ємного нерівномірно-компонентного стиснення: дис. ... канд. техн. наук. - Кривий Ріг, 2016. - 158 с.
28. Park, S.-J.; Kim, H.-W.; Joo, Y.-S. Leaky Lamb Wave Radiation from a Waveguide Plate with Finite Width. *Appl. Sci.* 2020, 10, 8104. <https://doi.org/10.3390/app10228104>.
29. **Nakoda, C.; Rose, J.; Shokouhi, P.; Lissenden, C.** Using Floquet periodicity to easily calculate dispersion curves and wave structures of homogeneous waveguides. In 44th Annual Review of Progress in Quantitative NDE; Chimenti, D.E., Bond, L.J., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2017; Volume 37, pp. 020016:1–020016:10.
30. **Groth, E.B.; Iturrioz, I.; Clarke, T.-G.R.** The dispersion curve applied in guided wave propagation in prismatic rods. *Lat. Am. J. Solids Struct.* 2018, 15, 1–27.
31. **Моркун Н. В., Тронь В. В., Сердюк О. Ю., Гапоненко А. А., Грищенко С. М., Бобров Є. Ю.** Визначення параметрів пульпи у робочій камері магнітного сепаратора на основі оцінки процесу розповсюдження хвиль Лемба // Гірничий вісник. – Кривий Ріг, 2022. Вип. 110. С. 172-177.
32. **Feiwang Wang, Hongming Zhao, Huixin Dai, Wuxing Du.** Fully coupled multi-physics modeling of the multi-type magnetic particles dynamic behavior in low intensity magnetic separator. - *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 55(1), 2019, 163-172. DOI: 10.5277/ppmp18117.
33. **Meeker D.** Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.
34. **Werner, O.; Azulay, A.; Mikhailovich, B.; Levy, A.** Experimental Study of Sidewall Pressure Induced by Ferroparticles in Fluid under a Pulsating Magnetic Field. *Fluids* 2020, 5, 98. <https://doi.org/10.3390/fluids5020098>

Рукопис подано до редакції 01.11.2022