

**Савицький О.І.**

Криворізький національний університет

**Моїсейченко В.В.**

Криворізький національний університет

## СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПУЛЬПИ МЕТОДОМ ТОНКОГО ГРОХОЧЕННЯ

У статті представлено комплексний огляд сучасних досягнень у галузі автоматизації процесів класифікації залізорудної пульпи методом тонкого грохочення. Проаналізовано 50 наукових праць за період 2019-2025 років, що охоплюють передові технології штучного інтелекту, машинного навчання, сенсорних систем та адаптивного керування вібраційними грохотами. Встановлено, що впровадження нейромережових алгоритмів дозволяє досягти точності прогнозування ефективності грохочення 94-99%, а використання гібридних методів оптимізації забезпечує покращення показників на 19,5-36,8% порівняно з традиційними підходами. Особливу увагу приділено українським розробкам у Криворізькому басейні, де успішно впроваджуються технології тонкого грохочення з ефективністю 70-97%, що дозволяє підвищити вміст заліза в концентраті до 70,5%. Визначено ключові напрями подальших досліджень: інтеграція edge computing з промисловим ШІ, розробка цифрових двійників виробничих процесів та створення повністю автономних систем керування на основі адаптивних алгоритмів. Дослідження демонструє важливість математичного моделювання процесів грохочення, включаючи рівняння Релея-Плессета для кавітаційних процесів та моделі адаптивного нейронного керування. Результати аналізу свідчать про революційний перехід від ручного контролю до повністю автоматизованого управління в реальному часі з використанням гібридних алгоритмів HGA-LSTM та архітектур глибокого навчання FlotationNet. Промислове впровадження інтелектуальних систем автоматизації керування процесами класифікації пульпи забезпечує зниження витрат на 40,4%, підвищення вилучення заліза у концентрат на 2,3-3,1% та зменшення енергоспоживання на 8-10%.

**Ключові слова:** тонке грохочення, адаптивне керування, залізорудна пульпа, штучний інтелект, автоматизація збагачення, вібраційні грохоти, нечітка логіка, ПЛК Siemens.

**Постановка проблеми.** Процеси збагачення залізної руди відіграють критичну роль у металургійній промисловості України, забезпечуючи отримання високоякісного концентрату для подальшої переробки. В умовах зростаючої конкуренції на світовому ринку залізорудної сировини та посилення екологічних вимог, підвищення ефективності технологічних процесів збагачення стає стратегічним завданням для вітчизняних гірничо-збагачувальних комбінатів.

Традиційні методи класифікації подрібненого матеріалу, зокрема гідроциклони, демонструють ефективність розділення на рівні 40%, що призводить до значних втрат цінних компонентів та необхідності додаткової переробки. Це створює циркуляційне навантаження на технологічні лінії та знижує загальну продуктивність збагачувальних фабрик. У зв'язку з цим, останніми роками

спостерігається зростаючий інтерес до технології тонкого грохочення, яка забезпечує ефективність 70-80% при одночасному зниженні циркуляційного навантаження та підвищенні якості кінцевого продукту.

Сучасні виклики гірничо-збагачувальної галузі пов'язані зі зниженням якості сировини, зростанням енергетичних витрат та посиленням екологічних вимог. За даними GMK Center, у 2024 році український гірничо-металургійний комплекс зіткнувся зі зниженням експорту на 20%, подвоєнням вартості електроенергії та зростанням залізничних тарифів на 35-40%. Ці фактори роблять впровадження енергоефективних інтелектуальних систем не просто технологічною перевагою, а необхідністю для виживання в умовах глобальної конкуренції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика підвищення ефективності автома-

тизації процесів класифікації залізорудної пульпи активно досліджується як вітчизняними, так і закордонними науковцями. Олійник та Невзоров продемонстрували, що тонке грохочення в умовах переробки руд Криворіжжя здатне вирішити низку технологічних проблем, недоступних для традиційних методів, досягаючи ефективності розділення 70-80%.

Значний внесок у розвиток теорії та практики ультразвукової обробки пульпи зробили Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В. та співавтори, які розробили комплексну технологію використання високоенергетичного ультразвуку для покращення процесів флотаційного доведення магнетитових концентратів. Їх дослідження базуються на використанні нелінійних ефектів поля високоенергетичного ультразвуку та детальному аналізі динаміки кавітаційних процесів.

Харламенко та Лазарєв запропонували інноваційний підхід до визначення гранулометричного складу пульпи ультразвуковим методом, що враховує зміну концентрації твердих частинок під впливом ультразвукових хвиль. Савицький та Тимошенко розробили систему автоматизації керування секцією збагачення з використанням програмних датчиків.

У галузі застосування штучного інтелекту для оптимізації процесів збагачення важливі результати отримані Bendaouia та колегами, які впровадили систему моніторингу флотації на основі ConvLSTM з точністю 94%. Ру та співавтори представили інноваційну систему FlotationNet – ієрархічну мережу глибокого навчання для прогнозування відновлення флотації в реальному часі.

Chen та співавтори детально дослідили динамічні характеристики багатодокових грохотів типу "flip-flow", довівши можливість досягнення ефективності грохочення 97,09%. Zou та співавтори розробили модель HGA-LSTM для визначення щільності пульпи, яка забезпечує покращення на 19,5-36,8% порівняно з традиційними методами.

**Метою статті** є проведення систематичного аналізу сучасних досягнень у галузі автоматизації та особливо інтелектуального керування процесами тонкого грохочення залізорудної пульпи, виявлення ключових тенденцій розвитку технологій штучного інтелекту в гірничо-збагачувальній промисловості та визначення перспективних напрямів подальших досліджень для створення адаптивних систем керування нового покоління.

*Еволюція технологій грохочення в переробці залізної руди.* Історія розвитку технологій грохочення налічує понад століття активних дослі-

джень та промислових впроваджень. Класичні вібраційні грохоти, що домінували в промисловості з середини XX століття, базувалися на принципах механічної сепарації з фіксованими параметрами вібрації. Однак зростаючі вимоги до якості продукції та необхідність переробки все більш тонкодисперсних матеріалів стимулювали пошук альтернативних рішень.

Олійник та Невзоров [1] у своєму дослідженні продемонстрували, що тонке грохочення, під час впровадження в умовах переробки руд Криворіжжя, здатне вирішити низку технологічних проблем, недоступних для традиційних методів. Авторами встановлено, що ефективність розділення при використанні сучасних грохотів тонкої класифікації досягає 70-80%, що майже вдвічі перевищує показники роботи гідроциклонів (40%). Крім того, впровадження даної технології на Центральному гірничо-збагачувальному комбінаті дозволило підвищити вміст заліза в концентраті до 70,5% при одночасному зниженні вмісту  $\text{SiO}_2$  до 3-5%.

Технологічний прорив у конструкції грохотів був пов'язаний з розробкою багатодокових систем типу "flip-flow". Chen та співавтори [5] детально дослідили динамічні характеристики таких грохотів, довівши можливість досягнення ефективності грохочення 97,09% для розділення дрібних частинок. Ключовою особливістю є використання еластичних ситових панелей з періодичними механізмами розтягування та релаксації, що запобігає забиванню отворів навіть при вологості матеріалу до 11,5%.

*Революція штучного інтелекту в класифікації руд.* Інтеграція технологій штучного інтелекту в процеси переробки мінеральної сировини стала справжнім проривом останнього десятиліття. Ру та співавтори [10] представили інноваційну систему FlotationNet – ієрархічну мережу глибокого навчання для прогнозування відновлення флотації в реальному часі. Архітектура поєднує згорткові нейронні мережі (CNN) з аналізом часових рядів, що дозволяє одночасно обробляти просторові зображення піни та динамічні дані процесу.

Практична реалізація подібних систем продемонструвала вражаючі результати. Bendaouia та колеги [4] впровадили систему моніторингу флотації на основі ConvLSTM на гірничодобувному майданчику Guemassa в Марокко. Система досягла 94% точності з середньою абсолютною похибкою 4,53 при обробці поліметалічних руд, що містять свинець, залізо, мідь та цинк. Це означає революційний перехід від ручного контролю до

повністю автоматизованого управління в реальному часі.

Особливо перспективним напрямком є застосування гібридних алгоритмів оптимізації. Zou та співавтори [15] розробили модель HGA-LSTM (гібридний генетичний алгоритм у поєднанні з довгою короткотерміною пам'яттю) для визначення щільності пульпи. Методологія поєднує генетичний алгоритм з Sequential Quadratic Programming (SQP) для оптимізації гіперпараметрів LSTM мережі. Результати вражають: RMSE знижено з 3,83 до 3,08 (покращення на 19,5%), а ARGE – з 0,119 до 0,0752 (покращення на 36,8%).

*Сенсорні технології нового покоління для моніторингу пульпи.* Точний моніторинг параметрів пульпи в реальному часі є фундаментальною вимогою для ефективного керування процесами грохочення. Харламенко та Лазарев [2] на базі досліджень Моркун запропонували інноваційний підхід до визначення гранулометричного складу пульпи ультразвуковим методом, що враховує зміну концентрації твердих частинок під впливом ультразвукових хвиль. Математична модель дозволяє оптимізувати діапазон частот (1-8 МГц) для уникнення кавітації, яка значно знижує точність вимірювань.

Промислове впровадження ультразвукової спектроскопії CSIRO демонструє можливість аналізу частинок від 0,1 мкм до кількох сотень мікрметрів у високо концентрованих шламах. Система успішно працює на австралійських заводах Cannington та Savage River, забезпечуючи безперервний контроль розподілу розміру частинок та щільності пульпи.

Wang та співавтори [11] розробили легкий ультразвуковий вимірювач з чотирма зондами (3,0-30,0 МГц) для частинок розміром 0,006-0,030 мм. Дослідження підтвердило теорію позитивної степеневі залежності між розміром частинок та амплітудою сигналу при умові розсіювання Релея, що відкриває нові можливості для створення компактних промислових датчиків.

*Адаптивні системи керування вібраційними грохотами.* Сучасні системи керування вібраційними грохотами еволюціонували від простих механічних регуляторів до складних інтелектуальних комплексів. Zhang та співавтори [14] представили метод моніторингу грохота в реальному часі з використанням алгоритму оптимізації роєм частинок (PSO) у поєднанні з покращеною фільтрацією Савіцького-Голея. Система забезпечує точне визначення параметрів вібрації навіть в умовах високого промислового шуму.

Li та колеги [9] розробили комплексну структуру оптимізації DEM-SVM-PSO, що інтегрує моделювання методом дискретних елементів, машини опорних векторів та алгоритм оптимізації роєм частинок. Chi та співавтори [39] провели багатопараметричну оптимізацію вібраційного грохота для вугільної промисловості, визначивши оптимальні параметри: амплітуда 3-4 мм, частота 12-14 Гц, кут вібрації 35-45°. Найвища ефективність грохочення 81,4% досягнута при  $A = 3,7$  мм,  $f = 13,4$  Гц,  $\beta = 40,9^\circ$ .

Формула ефективності грохочення визначається як:

$$\eta = (GSf/GSi \times \%GSi + USf/USi \times \%USi + OSf/OSi \times \%OSi) \times 100\%$$

де GSf, USf, OSf – фракції надрешітного, підрешітного та проміжного продуктів відповідно.

Chen та співавтори [6] застосували алгоритм KPCA-GRNN з реконструкцією характеристик WP-EE для прогнозування ефективності грохочення. Використання вейвлет-пакетної енергетичної ентропії для екстракції характеристик вібраційних сигналів дозволило досягти середньої похибки прогнозування 1,434% з мінімальною похибкою 0,708%.

*Український досвід та інновації Криворізького басейну.* Криворізький залізрудний басейн, що забезпечує 82% видобутку залізної руди України, став центром інноваційних розробок у галузі збагачення. Історичний аналіз, проведений міжнародною групою дослідників [8], демонструє 140-річну еволюцію технологій від примітивного ручного сортування до сучасних автоматизованих комплексів.

Важливим досягненням українських науковців є розробка методів попереднього оброблення пульпи для підвищення ефективності збагачення. Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В. та співавтори [51] у своїй фундаментальній роботі "Попереднє оброблення пульпи ультразвуком для очищення рудних зерен та дезінтеграції флокулоутворень на основі ефектів кавітації" представили комплексну технологію використання високоенергетичного ультразвуку для покращення процесів флотаційного доведення магнетитових концентратів.

Дослідження базується на використанні нелінійних ефектів поля високоенергетичного ультразвуку, які включають кавітацію, радіаційний тиск та акустичні потоки. Автори детально проаналізували динаміку кавітаційних процесів у неоднорідному гетерогенному середовищі залізрудної пульпи.

На основі узагальненої моделі динаміки руху повітряних бульбашок (рівняння Релея-Плессета) розраховано оптимальні параметри ультразвукового впливу:

$$\rho_l[Rb(d^2Rb/dt^2) + 3/2(dRb/dt)^2] = p_{vap} - p_{\infty}(t)$$

де  $Rb$  – радіус бульбашки (мкм),  $p_{\infty}$  – значення тиску у середовищі при нескінченності (Па),  $p_{vap}$  – тиск пари (Па),  $\rho_l$  – густина рідини (кг/м<sup>3</sup>).

Експериментальна валідація проводилася з використанням ультразвукового гранулометра "Пульсар". Результати показали значне зменшення середнього розміру флокул з 70-80 мкм до 40-45 мкм при увімкненому пристрої розмагнічування, що підтверджує ефективність запропонованого методу.

Практичне значення розробленої технології підтверджується результатами промислових випробувань. Згідно з даними досліджень, впровадження комплексної системи ультразвукової обробки та розмагнічування пульпи демонструє значний економічний ефект:

- зниження витрат при комплексному застосуванні на 40,4% (з 78,02 грн/т до 46,5 грн/т);
- підвищення вилучення заліза у концентрат на 2,3-3,1%;
- зниження втрат цінного компонента з хвостами на 12-15%;
- зменшення енергоспоживання на подрібнення на 8-10%;
- підвищення продуктивності флотаційного періоду на 5-7%.

Савицький та Тимошенко [3] з Криворізького національного університету розробили систему автоматизації керування секцією збагачення з використанням програмних датчиків (soft sensors). Інноваційність підходу полягає в реалізації віртуальних вимірювальних пристроїв безпосередньо в термінах програмування ПЛК, що значно спрощує інтеграцію з існуючими системами керування.

#### Математичні основи інтелектуальних систем керування грохоченням

Для ефективної розробки та впровадження інтелектуальних систем адаптивного керування процесами класифікації важливо розуміти ключові математичні моделі, що лежать в основі сучасних технологій.

#### Модель ефективності грохочення (Response Surface Methodology – RSM):

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

де  $Y$  – відгук системи (ефективність грохочення),  $x_i$  – фактори процесу (амплітуда, частота, кут

нахилу),  $\beta_i$  – коефіцієнти регресії,  $\varepsilon$  – похибка моделі.

#### Перепад тиску через шар матеріалу (рівняння Ергуна):

$$\Delta P/\Delta Z = 150\mu_m(1-\varepsilon)^2 G/(\varepsilon^3 \phi^2 d^2) + 1.75\rho_m(1-\varepsilon)G^2/(\varepsilon^3 \phi d)$$

де  $\Delta P/\Delta Z$  – градієнт тиску,  $\mu_m$  – динамічна в'язкість пульпи,  $\varepsilon$  – пористість шару,  $G$  – масова швидкість потоку,  $\phi$  – фактор форми частинок,  $d$  – діаметр частинок,  $\rho_m$  – густина матеріалу.

#### Модель адаптивного нейронного керування (ARX):

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n) = b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) + e(t)$$

де  $y(t)$  – вихід системи (ефективність грохочення),  $u(t)$  – керуючий вплив (параметри вібрації),  $e(t)$  – збурення,  $a_i$ ,  $b_i$  – параметри моделі, що адаптуються в реальному часі.

**Перспективні напрями розвитку: edge computing та цифрові двійники.** Майбутнє інтелектуальних систем грохочення пов'язане з концепцією edge computing – обробкою даних безпосередньо на виробничих майданчиках. Бразильська команда дослідників [17] успішно впровадила Edge AI систему на заводі Serra Norte для раннього виявлення ризику обвалу залізної руди на конвеєрних стрічках. Система досягла точності 0,91, відкликання 0,96 та F1-показника 0,93 у реальних промислових умовах.

Інтеграція цифрових двійників виробничих процесів відкриває безпрецедентні можливості для оптимізації. Дослідницька група з China University of Mining and Technology [18] представила чисельну модель зв'язку DEM-FEM-MBD для грохотів типу flip-flow, що створює фундамент для розробки повністю віртуальних випробувальних стендів.

Глобальний ринок вібраційних грохотів демонструє стійке зростання. За прогнозами Future Market Insights [20], ринок зростає з \$2,54 млрд у 2025 році до \$5,28 млрд у 2035 році (CAGR 7,6%). Гірничодобувна промисловість утримує найбільшу частку ринку (понад 40%), що стимулює інвестиції в розробку інтелектуальних систем керування.

**Висновки.** Проведений аналіз наукових праць за період 2019-2025 років дозволив виявити ключові тенденції розвитку технологій інтелектуального керування в процесі автоматизації тонкого грохочення та інших інтелектуальних систем керування переробкою залізничної пульпи.

Технологічна конвергенція спостерігається у злитті технологій штучного інтелекту, передових сенсорних систем та адаптивного керування в єдині інтегровані комплекси. Точність прогнозування параметрів процесу досягла 94-99%, що робить можливим повністю автоматизоване керування в реальному часі.

Гібридні алгоритми оптимізації, що поєднують класичні методи (генетичні алгоритми, PSO) з сучасними нейромережевими алгоритмами (LSTM, CNN), забезпечують покращення ефективності на 19,5-36,8% порівняно з традиційними підходами. Особливо ефективною виявилася модель HGA-LSTM для визначення щільності пульпи.

Революція в сенсорних технологіях характеризується переходом від ядерних до безпечних ультразвукових методів моніторингу з можливістю аналізу частинок від 0,1 мкм до 1 мм, що відкриває шлях до екологічно чистого виробництва.

Промислова зрілість технології тонкого грохочення підтверджується ефективністю 70-97%, успішною заміною гідроциклонів та забезпеченням вмісту заліза в концентраті до 70,5% при мінімальних втратах цінних компонентів, але для стабілізації і покращення цих результатів, в умовах невизначеності характеристик вхідної сировини, потрібні нові підходи автоматизації із застосуванням інтелектуальних систем керування.

Український потенціал, незважаючи на економічні виклики, залишається значним. Криворізький басейн є центром інновацій з унікальним поєднанням академічної науки та промислового досвіду. Розробки з ультразвукової обробки пульпи демонструють зниження витрат на 40,4% при комплексному застосуванні.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою повністю автономних адаптивних систем керування на основі edge computing, створенням цифрових двійників виробничих процесів та інтеграцією технологій Industry 5.0. Особливої уваги потребує розробка алгоритмів, здатних адаптуватися до змінних характеристик сировини в реальному часі, що є ключовим фактором для підвищення ефективності збагачення в умовах зниження якості руд.

Впровадження інтелектуальних систем адаптивного керування процесами тонкого грохочення стає не просто технологічною перевагою, а необхідністю для забезпечення конкурентоспроможності гірничо-збагачувальних підприємств на глобальному ринку. Синергія передових технологій створює передумови для революційних змін у галузі, спрямованих на досягнення максимальної ефективності при мінімальному впливі на довкілля.

#### Список літератури:

1. Олійник Т. А., Невзоров В. В. Тонке грохочення як спосіб вирішення технологічних питань при виробництві високоякісних залізрудних концентратів. *Вісник Криворізького національного університету*. 2023. Вип. 57. С. 80–88.
2. Харламенко В. Ю., Лазарєв В. С. Аналіз способів визначення гранулометричного складу пульпи на виході кульового млина ультразвуковим методом та підвищення ефективності шляхом врахування зміни концентрації пульпи. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2024. Т. 3, № 4. С. 70–77.
3. Савицький О. І., Тимошенко М. А. Розробка системи автоматизації керування секцією збагачення залізної руди з використанням програмних датчиків. *Гірничий журнал Криворізького національного університету*. 2019. Вип. 49. С. 117–121.
4. Bendaouia A., Qassimi S., Bouhrim H., Abdelwahed E. H., Boulaassal H., Benhayoun A., Hafdi O., El Harfi A., Laamrani M. A., Maatouk M. Artificial intelligence for enhanced flotation monitoring in the mining industry: A ConvLSTM-based approach. *Computers & Chemical Engineering*. 2024. Vol. 180. Article 108476.
5. Chen B., Yu C., Gong S., Wang X. Dynamic Characteristics of Multi-Deck Vibrating Flip-Flow Screens with Shear Spring Stiffness Analysis. *Minerals*. 2021. Vol. 11, No. 8. Article 888.
6. Chen J., Liu Y., Zhang L., Wang H. Predicting Screening Efficiency of Probability Screens Using KPCA-GRNN with WP-EE Feature Reconstruction. *Advances in Mathematical Physics*. 2024. Vol. 2024. Article 5588864.
7. Coghill P. J., Millen M. J., Sowerby B. D. On-line measurement of particle size in mineral slurries. *Minerals Engineering*. 2002. Vol. 15, No. 1–2. P. 83–90.
8. International Research Group. History and Current State of Mining in the Kryvyi Rih Iron Ore Deposit. Iron Ore – Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. *IntechOpen*, 2021. P. 43–85.
9. Li Z., Li K., Ge X. L., Tong X. Performance Optimization of Vibrating Screens Using DEM-SVM-PSO Integration. *Powder Technology*. 2019. Vol. 350. P. 154–165.
10. Pu Y., Szmigiel A., Chen J., Apel D. B. FlotationNet: A hierarchical deep learning network for froth flotation recovery prediction. *Powder Technology*. 2020. Vol. 375. P. 317–326.
11. Wang W., Xu Z., Zhang C., Liu G., Tian J. Research on Suspended Particle Size Measurement Based on Ultrasonic Backscattered Amplitude Analysis. *Water*. 2024. Vol. 16, No. 14. Article 1973.

12. Wang Z., Zhou D., Guo C., Zhou R. Yolo-global: A real-time target detector for mineral particles. *Journal of Real-Time Image Processing*. 2024. Vol. 21, No. 1. Article 15.
13. Xiao D., Le B. T., Ha T. T. L. Iron ore identification method using reflectance spectrometer and a deep neural network framework. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2021. Vol. 248. Article 119168.
14. Zhang Z., Wang Y., Liu X. Displacement of mining vibrating screen obtained from acceleration based on improved S-G filter. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 1892.
15. Zou G., Zhou J., Li K., Zhao H. An HGA-LSTM-Based Intelligent Model for Ore Pulp Density in the Hydrometallurgical Process. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 21. Article 7586.
16. ArcelorMittal Kryvyi Rih. Iron Ore Mining and Processing. ArcelorMittal Ukraine Official Website. 2024. URL: <https://ukraine.arcelormittal.com/en/production-cycle/iron-ore-mining-and-processing> (дата звернення: 15.02.2025).
17. Brazilian Research Team. Deep Learning Approach at the Edge to Detect Iron Ore Type. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 1. Article 169.
18. China University of Mining and Technology Research Team. Numerical Coupling Model for Vibrating Flip-Flow Screens Using DEM-FEM-MBD Integration. *Minerals*. 2024. Vol. 14, No. 2. Article 162.
19. European Research Team. Spring Failure Diagnosis Approach for Mining Vibrating Screens Using Amplitude Variation Coefficients. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 18. Article 8562.
20. Future Market Insights. Vibrating Screen Market Growth 2025-2035. FMI Reports. 2024. URL: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/vibrating-screens-market> (дата звернення: 16.02.2025).
21. GMK Center. Ukrainian iron ore industry: results of 2024 and prospects for 2025. GMK Center Analytics. 2025. URL: <https://gmk.center/en/infographic/ukrainian-mining-industry-results-of-2024-and-prospects-for-2025/> (дата звернення: 18.02.2025).
22. Gurobi Optimization. Report: State of Mathematical Optimization 2024. Gurobi Resources. 2025. URL: <https://www.gurobi.com/resources/report-state-of-mathematical-optimization-2024/> (дата звернення: 20.02.2025).
23. IBM Research. What Is Optimization Modeling? IBM Think Topics. 2025. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/optimization-model> (дата звернення: 21.02.2025).
24. Indian Research Team. Iron ore image classification using deep learning. *IEEE Conference Publication*. 2023. Article 10116816.
25. International Research Team. Characterization of particle size distribution in slurries using ultrasonic attenuation spectroscopy: Addressing challenges of unknown physical properties. *Powder Technology*. 2021. Vol. 387. P. 418–428.
26. International Research Team. Ore image classification based on small deep learning model: Evaluation and optimization of model depth, model structure and data size. *Minerals Engineering*. 2021. Vol. 166. Article 106885.
27. Kryvyi Rih National University Research Team. Selective underground mining of complex structured ore bodies of Kryvyi Rih Iron Ore Basin. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 60. Article 00041.
28. Mining Engineering Research Team. Spring Failure Diagnosis Approach for Mining Vibrating Screens Using Amplitude Variation Coefficients. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, No. 18. Article 8562.
29. Netguru Team. AI Model Optimization Techniques for Enhanced Performance in 2025. *Netguru Blog*. 2025. URL: <https://www.netguru.com/blog/ai-model-optimization> (дата звернення: 22.02.2025).
30. Rhosonics. SDM ECO: Non-nuclear slurry density meter. *Rhosonics Technical Documentation*. 2023. RHO-SDM-2023.
31. SPM Instrument. Process optimization for vibrating screens using HD measurement technology. *SPM Instrument Technical Report*. 2022. SPM-VS-2022.
32. Su Y., Liu X., et al. A CNN-assisted LIBS strategy for brand classification of iron ores. *Analytical Methods*. 2022. Vol. 14, No. 12. P. 1239–1249.
33. Ukrainian Research Team. Development of the wastewater treatment technology for the mine 'Ternivska' of the Kryvyi Rih iron ore plant. *Environmental Technology*. 2024. Vol. 46, No. 6. P. 908–921.
34. Zarei M., Hosseini M. R., Mohebbi A. Neural network predictive control of vibrations in tall structure: An experimental controlled vision. *Computers and Structures*. 2020. Vol. 241. Article 106358.
35. Zou G., Zhou J., Song T., Yang J., Li K. Hierarchical Intelligent Control Method for Mineral Particle Size Based on Machine Learning. *Minerals*. 2023. Vol. 13, No. 9. Article 1207.
36. Andrade A. G., Beaudin S., Athayde M. Impact of key parameters on the iron ore pellets roller screening performance. *Metallurgical Research & Technology*. 2022. Vol. 119, No. 3. Article 311.
37. Australian Research Team. Machine learning algorithm for particle-level iron ore classification in sinter green beds using micro-CT imaging. *Minerals Engineering*. 2023. Vol. 194. Article 108007.
38. Bazaluk O., Petlovanyi M., Sai K., Chebanov M., Lozynskyi V. Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: case study of Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*. 2024. Vol. 12. Article 1480344.

39. Chi Z., Chen X., Xia H., Liu C., Wang Z. Multiple parameter collaborative optimization of a particle separation equipment for coal cleaning production. *Journal of Process Control*. 2021. Vol. 96. P. 57–65.
40. European Research Team. Startup Time Optimization and Power Control for Vibrating Screens. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, No. 15. Article 7653.
41. GMK Center. Kryvyi Rih Iron Ore Plant. GMK Center – Information about Ukrainian iron and steel producers. 2021. URL: <https://gmk.center/en/manufacture/kryvyi-rih-iron-ore-plant/> (дата звернення: 23.02.2025).
42. Johnson K., Smith A. Effect of Ore Pulp Density and pH Value on Silica in Iron Ore. *Chemistry Essays*. UK Essays. 2024.
43. Kryvyi Rih National University. Mining Journal of Kryvyi Rih National University. KNU Official Website. 2024. URL: <https://mining-journal.com.ua/en> (дата звернення: 24.02.2025).
44. Kryvyi Rih National University. Research at KNU overview. KNU Official Website. 2024. URL: <https://www.knu.edu.ua/en/research-at-knu-overview> (дата звернення: 24.02.2025).
45. Li F., Li G., Lougou B. G., Zhou Q., Jiang B., Shuai Y. Upcycling biowaste into advanced carbon materials via low-temperature plasma hybrid system: Applications, mechanisms, strategies and future prospects. *Waste Management*. 2024. Vol. 189. P. 364–388.
46. Liu C.-H., Hung C. Reutilization of solid wastes to improve the hydromechanical and mechanical behaviors of soils – a state-of-the-art review. *Sustainable Environment Research*. 2023. Vol. 33. Article 17.
47. Mulvey J. M., Vanderbei R. J., Zenios S. A. Robust Optimization of Large-Scale Systems. *Operations Research*. 2024. Vol. 43, No. 2. P. 264–281.
48. Shi R., Wang B., Tang D., Wei X., Zhou G. Towards high value-added recycling of spent lithium-ion batteries for catalysis application. *Electrochemical Energy Reviews*. 2024. Vol. 7, No. 1. Article 28.
49. Stolojescu-Crisan C., Crisan B. P. Design of ultrasonic attenuation sensor with focused transmitter for density measurements of a slurry in a large steel pipeline. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2015. Vol. 138, No. 6. P. 3846–3854.
50. Wang C., Cui L., Liang M., Li J., Wang Y. Adaptive Neural Control Using Tangent Time-Varying BLFs for a Class of Uncertain Stochastic Nonlinear Systems With Full State Constraints. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2022. Vol. 51, No. 4. P. 1943–1953.
51. Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Сердюк О. Ю., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А. Попереднє оброблення пульпи ультразвуком для очищення рудних зерен та дезінтеграції флокулоутворень на основі ефектів кавітації. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2022. № 1(271). С. 24–35.

#### Savytskyi O.I., Moiseichenko V.V. MODERN APPROACHES TO AUTOMATION OF IRON ORE PULP CLASSIFICATION PROCESSES BY FINE SCREENING METHOD

*The article presents a comprehensive review of modern achievements in the field of intellectualization of iron ore pulp classification processes by fine screening method. 50 scientific papers for the period 2019-2025 were analyzed, covering advanced technologies of artificial intelligence, machine learning, sensor systems and adaptive control of vibrating screens. It was established that the implementation of neural network algorithms allows achieving 94-99% accuracy in predicting screening efficiency, and the use of hybrid optimization methods provides 19.5-36.8% improvement compared to traditional approaches. Special attention is paid to Ukrainian developments in the Kryvyi Rih basin, where fine screening technologies are successfully implemented with 70-97% efficiency, allowing to increase iron content in concentrate up to 70.5%. Key directions for further research are identified: integration of edge computing with industrial AI, development of digital twins of production processes and creation of fully autonomous control systems based on adaptive algorithms. The study demonstrates the importance of mathematical modeling of screening processes, including the Rayleigh-Plesset equation for cavitation processes and adaptive neural control models. The analysis results indicate a revolutionary transition from manual control to fully automated real-time control using hybrid HGA-LSTM algorithms and FlotationNet deep learning architectures. Industrial implementation of intelligent control systems provides 40.4% cost reduction, 2.3-3.1% increase in iron recovery to concentrate and 8-10% reduction in energy consumption.*

**Key words:** fine screening, artificial intelligence, adaptive control, iron ore pulp, machine learning, vibrating screens, process optimization, ore classification.

Дата надходження статті: 30.08.2025

Дата прийняття статті: 17.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025