



Founders: State University of Economics and Technology

ISSN: 3041-1246

E-mail: ete@duet.edu.ua Journal homepage: <https://ete.org.ua>

JEL: L640

DOI: 10.62911/ete.2025.03.02.07

Analytical studies of the operation of a vertically directed vibratory-magnetic separator

Citation:

Shved, S., Zaitsev, H., Henkulenko, S. & Shumylo, O. (2025). Analytical studies of the operation of a vertically directed vibratory-magnetic separator. Scientific and practical journal "Economics and technical engineering", Vol.3 No.2 (2025), 78–89, <https://doi.org/10.62911/ete.2025.03.02.07>

Serhii Shved

PhD, Assoc. Prof, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shved_sv@duet.edu.ua

 *ORCID ID: 0000-0003-2169-8893*

Hennadii Zaitsev

PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: zaitsev@kneu.dp.ua

 *ORCID ID: 0000-0002-7909-9044*

Serhii Henkulenko

Postgr. State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: henkulenko_sm_23851@kneu.dp.ua

 *ORCID ID: 0000-0002-0991-2343*

Oleh Shumylo

Postgr. State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shumylo_os_23863@kneu.dp.ua

 *ORCID ID: 0009-0001-6150-6924*

Abstract: The article discusses a new design and operation of a vertically directed vibration-magnetic separator intended for the disposal of iron-containing waste from mining and metallurgical enterprises. The problem of recycling iron-containing waste in Ukraine is quite acute and consists of large volumes, outdated processing technologies and equipment, and negative environmental impact. Outdated recycling technologies lead to soil, water and air pollution, as well as the loss of valuable secondary resources. An effective solution to the problem requires the introduction of modern technologies and equipment for processing accumulated iron-containing waste. The aim of the work is to study the processing and disposal of iron-containing waste using a new vertically directed vibration-magnetic separator. The main methods used in the work were analytical studies and mathematical modelling of processes occurring in a vertically directed vibration-magnetic separator. As a result of the research, the main patterns of the process of enrichment of iron-containing materials were obtained for the proposed design of the vibration-magnetic separator, which allows selecting rational and effective parameters of the technical system under consideration. The research results can be used to develop modern and effective equipment for the enrichment of iron-bearing waste from mining and metallurgical enterprises.

Keywords: iron-bearing waste; slag; processing; vertical vibration-magnetic separator; working body; helicoid; vibration; magnetic field; productivity; vortex vibration field.

Received: 15/12/2025

Accepted: 19/12/2025



JEL: L640

Analytical studies of the operation of a vertically directed vibratory-magnetic separator

Serhii Shved

PhD, Assoc. Prof, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shved_sv@duet.edu.ua

 ORCID ID: 0000-0003-2169-8893

Hennadii Zaitsev

PhD, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: zaitsev@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0002-7909-9044

Serhii Henkulenko

Postgr. State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: henkulenko_sm_23851@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0000-0002-0991-2343

Oleh Shumylo

Postgr. State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine

e-mail: shumylo_os_23863@kneu.dp.ua

 ORCID ID: 0009-0001-6150-6924

Abstract: The article discusses a new design and operation of a vertically directed vibration-magnetic separator intended for the disposal of iron-containing waste from mining and metallurgical enterprises. The problem of recycling iron-containing waste in Ukraine is quite acute and consists of large volumes, outdated processing technologies and equipment, and negative environmental impact. Outdated recycling technologies lead to soil, water and air pollution, as well as the loss of valuable secondary resources. An effective solution to the problem requires the introduction of modern technologies and equipment for processing accumulated iron-containing waste. The aim of the work is to study the processing and disposal of iron-containing waste using a new vertically directed vibration-magnetic separator. The main methods used in the work were analytical studies and mathematical modelling of processes occurring in a vertically directed vibration-magnetic separator. As a result of the research, the main patterns of the process of enrichment of iron-containing materials were obtained for the proposed design of the vibration-magnetic separator, which allows selecting rational and effective parameters of the technical system under consideration. The research results can be used to develop modern and effective equipment for the enrichment of iron-bearing waste from mining and metallurgical enterprises.

Keywords: iron-bearing waste; slag; processing; vertical vibration-magnetic separator; working body; helicoid; vibration; magnetic field; productivity; vortex vibration field.

Аналітичні дослідження роботи вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії

Сергій Швед

доцент, к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: shved_sv@duet.edu.ua

 ORCID iD: 0000-0003-2169-8893

Геннадій Зайцев

к.т.н., Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: zaitsev@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0000-0002-7909-9044

Сергій Генкуленко

аспірант, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: henkulenko_sm_23851@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0000-0003-4629-1184

Олег Шумило

аспірант, Державний університет економіки і технологій, Кривий Ріг, Україна

e-mail: shumylo_os_23863@kneu.dp.ua

 ORCID iD: 0009-0001-6150-6924

Анотація: У статті розглянуто нову конструктивну схему та роботу вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії призначеного для утилізації залізовмісних відходів гірничо-металургійних підприємств. Проблема утилізації залізовмісних відходів в Україні є досить актуальною і полягає в їх великих обсягах, застарілих технологій та обладнання з переробки і негативному впливі на довкілля. Застарілі технології утилізації призводить до забруднення ґрунту, води та повітря, а також до втрати цінних вторинних ресурсів. Ефективне вирішення проблеми вимагає впровадження сучасних технологій та обладнання з переробки накопичених залізовмісних відходів. Метою роботи є дослідження переробки і утилізації залізовмісних відходів з використанням нового вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії. Основними методами, використаними в роботі, були аналітичні дослідження та математичне моделювання процесів, що відбуваються у вібраційно-магнітному сепараторі вертикально направленої дії. В результаті досліджень для запропонованої конструкції вібраційно-магнітного сепаратора отримані основні закономірності процесу збагачення залізовмісних матеріалів, що дозволяє вибрати раціональні та ефективні параметри розглядаємої технічної системи. Результати досліджень можуть бути використані для розробки сучасного та ефективного обладнання з збагачення залізовмісних відходів гірничо-металургійних підприємств.

Ключові слова: залізовмісні відходи; шлаки; переробка; вертикальний вібраційно-магнітний сепаратор; робочий орган; гелікоїд; вібрація; магнітне поле; продуктивність; вихрове вібраційне поле.

Вступ (Introduction)

Відомо що до залізовмісних відходів гірничо-металургійних підприємств належать різноманітні матеріали, які утворюються в процесі видобутку, збагачення та переробки залізних руд, до яких відносяться: відходи видобутку і збагачення; шлаки; пилоподібні відходи та шлами; окалина; металобрухт і неліквіди; відпрацьовані футеровочні матеріали.

Основну частину залізовмісних відходів гірничо-металургійних підприємств складають відходи видобутку і збагачення залізних руд та шлаки доменного і сталеплавильного виробництв (*Hubina, et al., 2023*). Так на прикладі Криворізького басейну відходи видобутку та збагачення залізної руди складає більш ніж 96% від усієї промисловості регіону (*Bondar, et al., 2020*).

Проведений аналіз в роботах (*Hubina, et al., 2023, Kyiashko, et al., 2020, Bondar, et al., 2020*) показує, що річне утворення шлаків доменного і сталеплавильного виробництв становить 4,4 млн тонн та 2,5 млн тонн відповідно. На теперішній час підприємствами України накопичено 240 млн тонн шлаків. Ці відходи займають значні території (*Salii, et al., 2020*), та негативно впливають на екосистему навколо їх (*Bondar, et al., 2020*), а також є джерелом

вторинної сировини, яка є стратегічним ресурсом гірничо-металургійного комплексу України та потребують їх утилізації (Hubina, et al., 2023).

Одним з розвинутих способів вилучення залізорудної складової з відвалів гірничо-металургійного комплексу є гравітаційний спосіб розділення частинок, який використовує різноманітні сегрегаційні процеси і зв'язане з ними необхідне обладнання в повітряному і водному середовищах (Kravchenko, et al., 2006, Kravchenko, et al., 2018, Biletskyi, et al., 2020, Oliinyk, et al., 2023, Pilov, 2021). Але така велика кількість запропонованих способів, а відповідно, і обладнання до них, ускладнює з одного боку, вибір найкращого для тих чи інших умов збагачення залізорудної частини матеріалу, з іншого – не призводить до розширення знань про його сегрегацію при впливі на нього комплексного вібраційно-гравітаційного та магнітного силового поля, які крім інших, є найбільш екологічно небезпечними.

На сьогодні для переробки доменних та сталеплавильних шлаків використовують застарілі технологічні схеми і обладнання, які не в змозі підвищувати продуктивність робіт і не дозволяють їх повну утилізацію. Слід відзначити, що крім цього, використані способи і засоби з утилізації шлаків недостатньо ефективні при переробці відвальних шлаків різних металургійних виробництв – доменного та сталеплавильного, які об'єднані в загальні відвали і мають різні фізико-механічні властивості (Bondar, et al., 2020). Як показує практика, основним засобом у всіх випадках вилучення заліза є навісна електромагнітна шайба або електромагнітний барабан стрічкового конвеєра, які не дозволяють суттєво підвищувати продуктивність ділянок утилізації металургійного шлаку.

Таким чином, з огляду проведеного аналізу, можна стверджувати, що робота, спрямована на дослідження по встановленню закономірностей процесу магнітно-вібраційно-гравітаційного збагачення залізовмісних відходів, що дозволяють з'ясувати раціональні параметри технічної системи та розробку відповідного обладнання для покращення вилучення залізовмісної складової з відходів гірничо-металургійного комплексу, не завдаючи шкоди екологічному довкіллю, є на даний час актуальною задачею.

Матеріали та методи (Materials and Methods)

Для встановлення закономірностей процесу вібраційно-гравітаційного магнітного збагачення залізовмісних відходів та вибору раціональних параметрів технічної системи запропонована модель рис. 1 вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії (далі сепаратор), яка є модифікацією раніше розробленого кафедрою інжинірингу з галузевого машинобудування Навчально-наукового інституту Державного університету економіки і технологій магнітного сепаратора (Zaitsev, et al., 2024), і включає: завантажувальний лоток 1, корпус 2, спіральний робочий орган 3, віброзбуджувачі 4, регульовані електромагніти 5, гумові пружні елементи 6, перевантажувач 7, приймальні бункера для залізовмісного 9 та немагнітного 8 матеріалів.

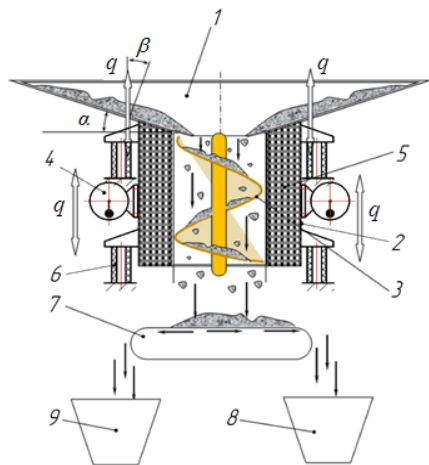


Рисунок 1. Модель вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії
Джерело: розроблено авторами

Функціонування сепаратора визначається двома послідовними технологічними етапами. Завантаження залізовмісного матеріалу (далі матеріал) здійснюється в лоток 1, виконаний з немагнітного матеріалу. Кут α між робочою поверхнею лотка і горизонтом значно менше, ніж кут природного укосу матеріалу що подається. Транспортування матеріалу по поверхні лотка 1 до спірального робочого органу 3 здійснюється під дією вібрації віброзбуджувачів 4 з прискоренням q . Далі матеріал потрапляє на сталеву спіральну поверхню робочого органу 3 з вертикальною віссю симетрії і включеним регульованим електромагнітом 5, який розташований в корпусі 2 сепаратора. В процесі руху матеріалу по спіральній поверхні робочого органу 3 до розвантажувального вікна за рахунок магнітного поля магнітна частина матеріалу прилипає до його поверхні та внутрішній поверхні корпусу 2, а немагнітна частина продовжує рухатись далі і пройшовши через розвантажувальне вікно, випадає на перевантажувач 7, який завантажує його в бункер немагнітного матеріалу 8.

Потім (див. рис. 1) подача матеріалу до завантажувального лотка 1 припиняється, а віброзбуджувачі 4 продовжують працювати до моменту поки уся немагнітна частина матеріалу з спірального робочого органу 3 вивантажиться через розвантажувальне вікно на перевантажувач 7 і завантажиться в бункер немагнітного матеріалу 8. Далі вимикаються електромагніти 5, а віброзбуджувачі 4 продовжують працювати, магнітна частина матеріалу відлипає від стінок корпусу 2 та поверхні робочого органу 3 і під дією вібраційно-гравітаційних сил рухається до розвантажувального вікна корпусу, де зсипається на перевантажувач 7, який в режимі реверсу подає і завантажує його в бункер магнітного матеріалу 9.

Кожен з етапів процесу вібраційно-магнітного збагачення накладає свої вимоги до конструктивного виконання сепаратора. Розглянемо ці вимоги нижче.

Результати (Results)

На першому етапі вібраційно-магнітної обробки матеріалу необхідно забезпечити задану продуктивність сепаратору за вихідним живленням. Це означає, що при заданій вібрації поверхня завантажувального лотка, повинна мати певний кут нахилу. Чим більший цей кут тим більшою буде продуктивність сепаратора, однак його зміна в більшу сторону обмежена технологічною умовою: за відсутності вібрації сировина на конічний поверхні повинна бути гарантовано нерухомою відносно розвантажувального отвору лотка (повинна зависнути). Але це означає, що

$$\alpha < \operatorname{tg}(k), (1)$$

де k – коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу.

Якщо відомий кут природного укосу для сухого матеріалу α_0 , то вираз (1), що відповідає зазначеній технологічній умові, можна звести до вигляду:

$$\alpha < \alpha_0, (2)$$

Похила поверхня завантажувального лотка зумовлює зростання висоти шару матеріалу в міру його просування до центру лотка. У зв'язку з цим необхідно враховувати умову відкритості розвантажувального отвору (повністю заповнений завантажувальний отвір навіть за умови вібраційної дії може викликати непрохідність робочого органу). Таким чином, необхідно встановити взаємозв'язок між кутом нахилу робочої поверхні завантажувального лотка і діаметром його розвантажувального отвору. На рис. 2 показана розрахункова схема, за якою встановлюється такий взаємозв'язок.

Об'ємна продуктивність сепаратора за вихідним матеріалом відповідно до прийнятої розрахункової схеми визначається наступною залежністю:

$$V = s \cdot v = s \cdot \frac{dl}{dt} \approx \operatorname{const}, (3)$$

де V – об'ємна продуктивність сепаратора за вихідним матеріалом, м³/с;

s – площа поперечного кільцевого перетину потоку матеріалу в заданому місці i в радіальному напрямку, м²;

v – швидкість потоку матеріалу в заданому місці в радіальному напрямку, м/с;

dl – елементарне приростання шляху в радіальному напрямку за елементарно малий проміжок часу dt , м.

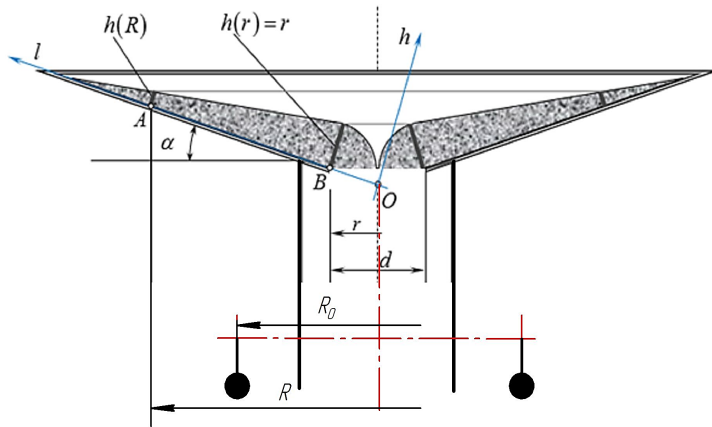


Рисунок 2. До розрахунку взаємозв'язку між кутом нахилу робочої поверхні завантажувального лотка і діаметром його розвантажувального отвору
Джерело: розроблено авторами

При цьому маємо на увазі, що при товщині шару матеріалу h , м

$$s = 2\pi l \cdot h = \frac{2\pi}{\cos \alpha} \cdot rh;$$

$$dl = \frac{dr}{\cos \alpha}.$$

Після підстановки цих залежностей в (3) отримуємо рівняння

$$V \frac{(\cos \alpha)^2}{2\pi \cdot v} = rh \text{ звідки } h(r) = \frac{(\cos \alpha)^2}{2\pi} \frac{V}{v \cdot r}, \quad (4)$$

Враховуючи, що при повністю присипаному розвантажувальному отворі висота шару матеріалу біля нього може дорівнювати радіусу отвору, тобто $h(r) = r$, отримуємо необхідне конструктивне співвідношення для радіуса розвантажувального отвору лотка:

$$r > \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{V}{2\pi v}}, \quad (5)$$

Або для діаметра цього отвору d , м:

$$d > \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{2V}{\pi v}}, \quad (6)$$

Якщо прийняти розвантажувальний отвір завантаженим наполовину просвіту, тоді

$$d = \cos \alpha \cdot \sqrt{\frac{V}{2\pi v}}, \quad (7)$$

Залежність висоти шару матеріалу при сталій продуктивності 0,1 м³/с від радіуса розвантажувального отвору лотка при його швидкості 0,1, 0,2 і 0,3 м/с представлена на рис. 4.

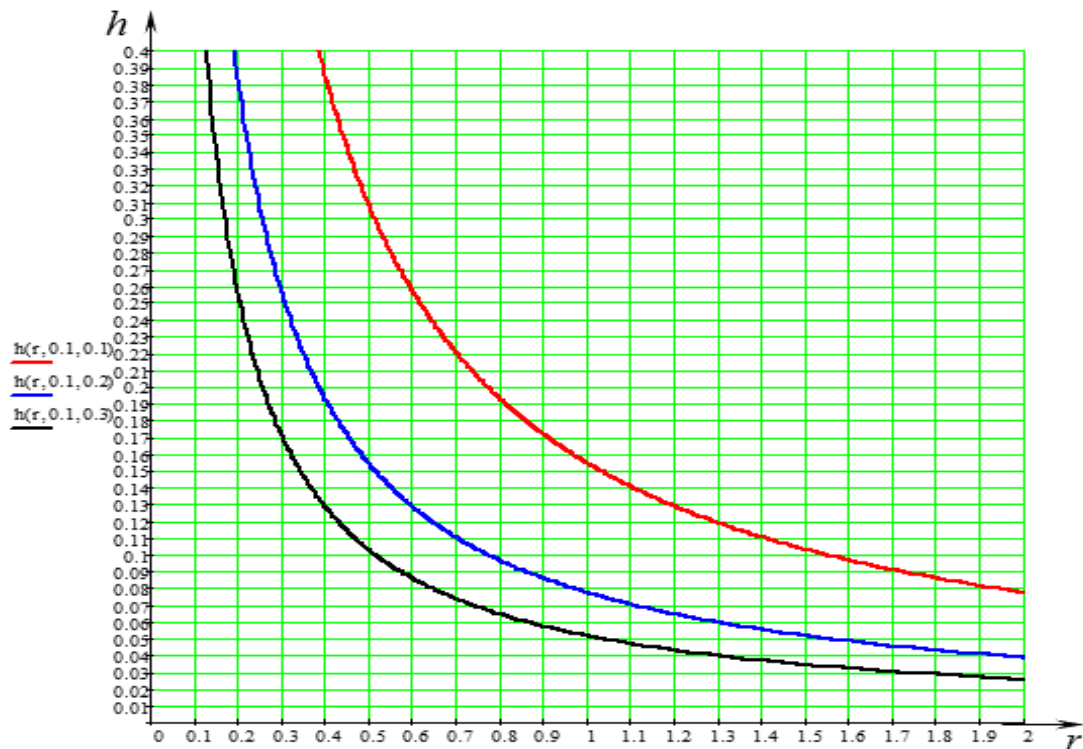


Рисунок 3. Залежність висоти шару матеріалу при сталій продуктивності $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ від радіуса розвантажувального отвору лотка при його швидкості 0,1, 0,2 і 0,3 м/с
Джерело: розроблено авторами

Із графіка видно, що висота шару матеріалу збільшується при зменшенні радіусу розвантажувального отвору лотка та швидкості транспортуємого матеріалу. Ця залежність дозволяє вибрати розміри розвантажувального отвору лотка, робочого органу сепаратора, забезпечуючи необхідну його продуктивність без зависання матеріалу в зоні його завантаження.

Після того, як матеріал провалюється в розвантажувальний отвір завантажувального лотка, він потрапляє в зону магнітно-вібраційної обробки (рис. 4). Тут на частинки матеріалу здійснюється дія трьох активних силових факторів: сили тяжіння $\bar{G}$; магнітної сили $\bar{F}$ і вібраційної сили інерції $\bar{Q}$. Оскільки в цій зоні відбувається накопичення частинок, що містять залізо, необхідна присутність магнітної поверхні великої площі, яка викликає появу дотичної $\bar{T}$ і нормальної $\bar{N}$ реактивних сил.

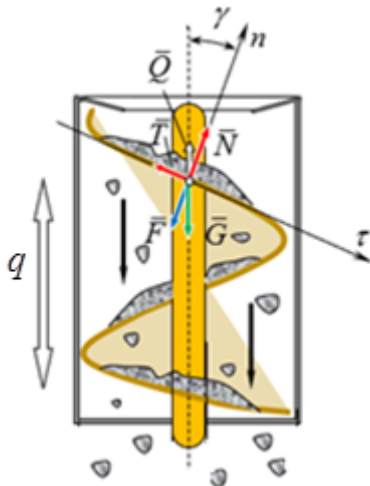


Рисунок 4. Рух матеріалу по робочому органу на етапі магнітно-вібраційної обробки
Джерело: розроблено авторами

Магнітна поверхня повинна пропускати повз себе весь матеріал і в той же час мати максимально можливу протяжність. Такій умові відповідає гелікоїдальна (спіральна) форма з необхідним кутом нахилу γ і кількістю витків.

Мінімальна кількість витків гелікоїда визначається умовою зустрічі всього потоку матеріалу з його поверхнею – це один повний виток.

У свою чергу, кут нахилу γ і характерні діаметри гелікоїда визначаються умовою гарантованого проходження потоку матеріалу через його робочий простір.

Магнітну силу F (Н) враховуємо залежно від індукції магнітного поля

$$F = \lambda B, (8)$$

де B – індукція магнітного поля в робочому просторі, Тл;

λ – коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструктивного виконання пристрою і струму в котушці електромагніту, А·м, визначається експериментально.

Приймаємо масу частинки пропорційною кубу її розміру. Тоді максимальна величина вібраційної сили інерції Q буде:

$$Q = \rho \delta^3 \cdot A \omega^2, (9)$$

де ρ – середня щільність частинок матеріалу, кг/м³;

δ – середня величина поперечного розміру частинки, м;

ω – кругова частота коливань робочого органу на поверхні гелікоїда, с⁻¹;

A – амплітуда коливань робочого органу в області гелікоїда, м.

Дотична реактивна сила T , (Н) існує в результаті дії сили тертя між поверхнею гелікоїда і частинками матеріалу та безпосередньо між частинками у верхніх шарах примагніченого до поверхні гелікоїда матеріалу. Максимальна величина сили тертя визначається законом Кулона, тобто

$$T = k \cdot N, (10)$$

де k – експериментально визначений коефіцієнт тертя спокою між частинками нашарованого на гелікоїді матеріалу;

N (Н) – величина нормальної сили реакції, яка дорівнює величині сили, що притискає частинку до поверхні гелікоїда.

Система рівнянь граничної рівноваги для частинки, примагніченої до шару матеріалу відповідно до прийнятої розрахункової схеми вздовж дотичної та нормальної осей, відповідно матиме вигляд:

$$\begin{cases} G \cdot \sin \gamma - T - Q \cdot \sin \gamma = 0 \\ N - F - G \cdot \cos \gamma + Q \cdot \cos \gamma = 0 \end{cases}, (11)$$

Нормальна реакція опори може бути виділена з кожного рівняння відповідно до підстановки (10):

$$N = F + (G - Q) \cdot \cos \gamma, (12)$$

$$N = (G - Q) \cdot \frac{\sin \gamma}{k}, (13)$$

Прирівнявши праві частини виразів, складаємо рівняння для визначення мінімального значення магнітної сили, достатньої для утримання частинки в заданих умовах:

$$(G - Q) \cdot \frac{\sin \gamma}{k} = F + (G - Q) \cdot \cos \gamma, (14)$$

звідки

$$F = (G - Q) \cdot \left(\frac{\sin \gamma}{k} - \cos \gamma \right), \quad (15)$$

Вираз (15) повинен бути додатним, тобто повинна дотримуватися наступна гранична умова для кута нахилу γ поверхні гелікоїда:

$$\operatorname{tg} \gamma > k \text{ або } \gamma > \operatorname{arctg}(k), \quad (16)$$

Місткість робочого органу по примагніченому до його поверхні магнітному матеріалу, тим більша, чим більша площа поверхні гелікоїда, тому максимальний об'єм магнітного матеріалу, який може знаходитися на поверхні робочого органу, визначається мінімальним кутом нахилу γ гелікоїда. Однак, чим менший кут нахилу гелікоїда, тим складнішим буде просування немагнітної частини матеріалу по шару примагніченого матеріалу, тому для полегшення такого руху необхідна наявність вібраційного впливу.

Також потрібно мати на увазі умову для безвідривного перебування частинки на шарі матеріалу, тобто умову позитивності нормальної реакції опори:

$$N > 0, \quad (17)$$

Скориставшись виразом (13), виконавши скорочення та перетворення, запишемо для визначення взаємозв'язку між прискореннями гравітаційного та вібраційного полів, кутом нахилу поверхні гелікоїда та коефіцієнтом тертя між ним та матеріалом:

$$(g - q) \cdot \frac{\sin \gamma}{k} > 0, \text{ звідки } q < g, \quad (18)$$

Таким чином величина вібраційного прискорення q на поверхні гелікоїда у вертикальному напрямку має бути менше прискорення вільного падіння g .

Ця умова не може бути виконана, якщо траєкторії вібраційного переміщення точок робочого органу вертикальні. Щоб виконати умову (16) і водночас забезпечити ефективну подачу матеріалу в завантажувальний лоток, необхідна наявність вихрового вібраційного поля, яке змодельоване і показане на рис. 5.

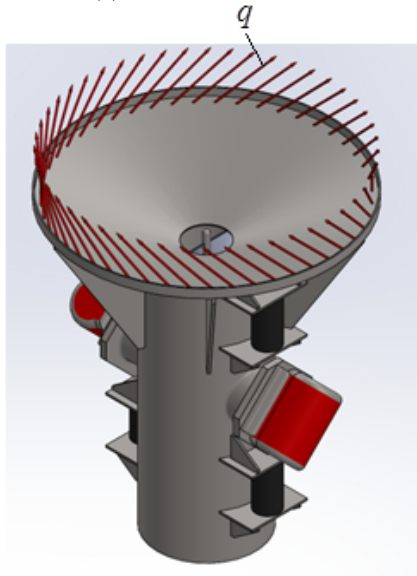


Рисунок 5. 3-D модель сепаратора з розташуванням його віброзбуджувачів для забезпечення вихрового вібраційного поля
Джерело: розроблено авторами

Уздовж вертикальної осі симетрії такого поля буде діяти інваріантний вектор мінімального вібраційного прискорення, який визначається:

$$q_{\min} = q_{\max} \cdot \cos \theta, (19)$$

де θ - кут нахилу вібраційної сили від вертикалі;

$q_{\max}$ – максимальне вібраційне прискорення.

Горизонтальна ж проекція вектору вібраційного прискорення $\tilde{q}$ не є інваріантною – вона буде залежати від радіального розташування точки A на поверхні завантажувального лотка відносно вертикальної осі симетрії вібраційного поля та радіусу розташування віброзбуджувачів відносно вертикальної осі симетрії сепаратора (див. рис. 3):

$$\tilde{q} = q_{\max} \cdot \frac{R}{R_0} \sin \theta, (20)$$

де R – поточний радіус досліджуваної точки A ;

R_0 – радіус розташування віброзбуджувачів відносно вертикальної осі симетрії сепаратора.

Використовуючи формулу (20) можна вибрати кут θ нахилу вібраційної сили від вертикалі при відомій максимальній величині вібраційного прискорення, що розвивається двома віброзбуджувачами в синхронному режимі роботи.

Межею першого етапу роботи сепаратора є переповнення камери робочого органу сепаратора примагніченим до його поверхні матеріалом. При цьому рух немагнітної частини матеріалу по його магнітній частині в робочому органі, стає ускладненим через критичне зменшення його просвіту.

Вивантаження магнітної частини матеріалу відбувається під дією сили тяжіння, реакції робочої поверхні гелікоїда та вібрацією, яка генерується двома самосинхронізуючими віброзбуджувачами. Коефіцієнт тертя k_2 між робочою поверхнею гелікоїда і матеріалом, що примагнітився до його поверхні визначається експериментально. Якщо кут нахилу робочої поверхні гелікоїда обрано з умови (16), в якій використовувався також експериментально визначений коефіцієнт тертя спокою k між частинками розташованими на гелікоїді матеріалу (частинка по шару частинок), то вивантаження магнітного матеріалу забезпечується. Тобто умова вивантаження магнітної частини матеріалу буде мати вигляд:

$$k_2 < k, (20)$$

Якщо вивантаження магнітної частини матеріалу з робочого органу ускладнено, наприклад, висока вологість матеріалу, розміри частинок матеріалу тощо, то для інтенсифікації процесу вивантаження, за допомогою частотного перетворювача, віброзбуджувачі включають в режим $q > g$.

Висновки (Conclusions)

Для збагачення залізовмісних відходів, запропонована конструкція вібраційно-магнітного сепаратора вертикально направленої дії та виконано аналіз його роботи.

В запропонованому сепараторі об'єднані три найбільш розповсюджені методи збагачення залізовмісних відходів: магнітний, вібраційний та гравітаційний. Робочий орган сепаратора виконаний у формі гелікоїда (спіралі), розташованого вертикально, що значно збільшує довжину його робочої поверхні, це забезпечує більш тривале перебування матеріалу на ній і разом з комбінованим методом збагачення я підвищує продуктивність сепаратора і ефективність сепарації в порівнянні з іншими конструкціями сепараторів. Вертикальна конструкція запропонованого сепаратора не займає багато місця і добре впишеться в більшість технологічних схем з переробки залізовмісних відходів.

Встановлено взаємозв'язок між кутом нахилу робочої поверхні завантажувального лотка і діаметром його розвантажувального отвору.

Встановлено залежність висоти шару матеріалу при швидкості транспортуемого матеріалу 0,1, 0,2 і 0,3 м/с від радіуса розвантажувального отвору лотка, аналіз якої показав, що висота шару матеріалу збільшується при зменшенні радіусу розвантажувального отвору лотка та швидкості транспортуемого матеріалу. Ця залежність дозволяє вибрати розміри розвантажувального отвору лотка, робочого органу сепаратора, забезпечуючи необхідну його продуктивність без зависання матеріалу в зоні завантаження в робочий орган.

Проаналізовано рух матеріалу по робочому органу на етапі магнітно-вібраційної обробки. В результаті чого було встановлено взаємозв'язок між прискореннями гравітаційного та вібраційного полів, кутом нахилу поверхні гелікоїда та коефіцієнтом тертя між ним та матеріалом. Окрім цього встановлено, що при мінімальному куту нахилу γ гелікоїда для забезпечення просування немагнітної частини матеріалу по шару примагніченого матеріалу, необхідна наявність вібраційного впливу і для забезпечення безвідривного режиму величина вібраційного прискорення q на поверхні гелікоїда у вертикальному напрямку має бути менше прискорення вільного падіння g , та визначена умова при якій, цей кут γ був би більш коефіцієнту тертя спокою k між частинками нашарованого матеріалу, що забезпечує його ефективну подачу в завантажувальний лоток.

Дослідженнями встановлено, що вивантаження магнітної частини матеріалу відбувається під дією сили тяжіння, реакції робочої поверхні гелікоїда та вібрацією, яка генерується двома самосінхронізуючими віброзбуджувачами, коли коефіцієнт тертя k_2 між робочою поверхнею гелікоїда і матеріалом що примагнітився до його поверхні, менший за коефіцієнт тертя спокою k між частинками матеріалу, що оброблюється.

Конфлікт інтересів (Conflicts of interest)

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування (Funding)

Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування

Внесок авторів (Authors contribution)

Концептуалізація, адміністрація проекту, методика, програмне забезпечення, Ш.С; перевірка, аналіз отриманих даних, формальний аналіз, З. Г.; візуалізація, Г.С., аналітичні дані, Ш.О. Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література (References)

- Biletskyi, V.S., Oliinyk, T.A., Smyrnov, V.O., & Skliar L.V. (2020). *Osnovy tekhniky ta tekhnolohii zbahachennia korysnykh kopalyn*. Kyiv : Lira-K. Publishing. P. 634. <https://lira-k.com.ua/files/contents/12770.pdf?srsId=AfmBOoqk-83Lywlvxv2STQrLJbF7gnL26Gs4L6Ovr6m9IdH9eqH109D4q>
- Bondar, O.I., Ryzhenko, N.O., & Salii, I.V. (2020). Otsinka ymovirnykh vplyviv na dovkillia za zdiisnennia planu dii z realizatsii vykorystannia promyslovykh vidkhodiv u Kryvorizkomu promyslovomu rehioni. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 4(31), 82–91. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.12>
- Bondar, O.I., Ryzhenko, N.O., & Salii, I.V. (2020). Nakopychennia shlakiv metalurhiinykh pidpriemstv: Otsinka vplyvu na dovkillia ta ekolohichne obgruntuvannia povodzhennia. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 3(30), 83–91.

<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.14>

Bondar, O.I., Ryzhenko, N.O., & Salii, I.V. (2020). Otsinka ymovirnykh vplyviv na dovkillia za zdiisnennia planu dii z realizatsii vykorystannia promyslovykh vidkhodiv u Kryvorizkomu promyslovomu rehioni. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 4(31), 82–91.

<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.12>

Hubina, V.H., & Horlytskyi, B.O. (2023). Problema zalizovmisnykh vidkhodiv hirnychometaluriinoho kompleksu Ukrainy – systemnyi pidkhid. *Heokhimiia tekhnohenezu*, 17 (2009), 26–28

<https://journals.igns.kyiv.ua/index.php/geotech/article/view/308>

Kravchenko, V.P., Taternyia, E.V., & Lazarevskaia, Yu.A. (2018). Pererobka vidvalnykh metalurhiinykh shlakiv. *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Serii: Tekhnichni nauky*, (37), 15–21. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.37.2018.160221>

Kravchenko, V.P., Fentisov, I.M., Strutynskyi, V.N., & Cherkasin, O.V. (2006) Sposib pererobky vidvalnykh metalurhiinykh shlakiv. *Patent Ukrainy 18107*, Biul. № 10, P. 4.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/300229>

Kyashko, V.T., Salii, I.V., Yakovenko, L.O., & Malynovskyi, Yu.O. (2020). Perspektyvni napriamy utylizatsii vidkhodiv hirnycho-zbahachuvalnoho vyrobnytstva. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 4(31), 103–106. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.15>

Oliinyk, T.A., Rumnytskyi, D.O., & Skliar, L.V. (2023). Sehrehatsiia chastynok pry hravitatsiinii separatsii mineralnykh ahrehativ u vodnomu seredovyshchi. *Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu*, 56, 47–54. http://fs.knu.edu.ua/periodicals/mining_journal/vesnik_knu/56/11.pdf

Pilov P.I. *Hravitatsiini metody zbahachennia korysnykh kopalyn*. (2021). Dnipro: Natsionalnyi tekhnichniyi universytet Dniprovskia politehnika. Publishing. P. 152.

<https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/8960e602-4984-40ab-9ea1-d66a81ec4078/content>

Salii, I.V., Ryzhenko, N.O., Zaselskyi, V.I., & Popolov, D.V. (2020). Doslidzhennia ta shliakhy polipshennia ekomonitorynhu v misti Kryvyi Rih. *Ekolohichni nauky: naukovo praktychnyi zhurnal*, 5(32), 16–22. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.5-32.2>

Zaitsev, H.L., Shved, S.V., Henkulenko, S.M., & Shumylo, O.S. (2024). Separator hravitatsiino-mahnitnoho rozdilennia. *Patent Ukrainy 157457*, Biul. № 42, P. 4.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1823481/>