

Отримані значення інтегрального показника дозволили побудувати моніторингову геопросторову карту, яка дозволило візуалізувати процеси, що відбуваються у сфері використання земель, попереджувати негативні явища на регіональному рівні та своєчасно реагувати на них.

### Список літератури

1. Цілі Сталого Розвитку: Україна. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf>.
2. **Василюк О. В.** Консервація деградованих земель та формування екомережі: правовий аспект. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: біологія. 2014. Вип. 20. № 1100. С. 229–234.
3. **Василюк О., Костюшин В., Коломицев Г.** Нові підходи до розбудови національної екомережі України. Природно-ресурсний потенціал збалансованого (сталого) розвитку України: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 19–20 квітня 2011). К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2011. Т. 2.
4. **Дейнега М. А., Масвський В. А.** Проектування національної екологічної мережі у контексті стратегії сталого розвитку: правовий аспект. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2014. Вип. 197. Ч. 2.
5. **Кагало О. О.** Розбудова екологічної мережі в Україні: принципи, проблеми, перспективи. Збірник Матеріалів дев'ятої наукової конференції молодих учених «Наукові основи збереження біотичної різноманітності» (Львів, 1–2 жовтня 2009). Л.: Інститут екології Карпат НАН України, 2009. С. 10–13.
6. **Ващишин М. Я., Шарван О. О.** Вплив законодавства ЄС на розвиток законодавства України про національну екологічну мережу. Сучасні тенденції розвитку національного законодавства України: Збірник тез міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 10-річчю створення юридичного факультету НУБіП (19–20 травня 2011 р.). 2011. С. 268.
7. **Артов А., Балобін С., Василюк О., Городецька Н., Кривохижа М., Мовчан Я., Рудик О., Сіренко І., Шапаренко С.** «Льодовиковий період» у заповідній справі (огляд ситуації у заповідній справі в Україні за 2008–2012 рр.) заг. ред. Кравченко О. Екологія. Право. Людина. 2013. № 17–18. С. 57–58.
8. **Шлапак А. В.** Реформування фінансово-економічного механізму управління природно-заповідним фондом. Механізм регулювання економіки. 2005. № 4. С. 51–62.
9. **Маринич О. М., Пархоменко Г. О., Петренко О. М., Шищенко П. Г.** Удосконалена схема фізико-географічного районування України. Укр. географ. журн. 2003. № 1. С. 16–20.
10. **Вяткін, К. І., Мороз Н. В., Шишкін Е. А., В'яткін Р. С.** Теоретико-методичні підходи до визначення поняття моніторингу земель. Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст» ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. № 7 (146). С. 281–285.
11. **Гірний Б. М.** Сучасний стан і перспективи розвитку природно-заповідного фонду України. Продуктивні сили і регіональна економіка: Зб. наук. пр.: У 2 ч. РВПС України НАН України. К.: РВПС України НАН України, 2004. Ч. 1. С. 91–98.
12. **Ковальчук І. П., Іванов Є. А., Свідерко І. Б.** Географічні особливості територіального розподілу об'єктів природно-заповідного фонду Львівської області. Наук. вісник Укр. держ. лісотехнічного ун-ту, 2004. Вип. 14.8. С. 51–62.
13. **Вяткін К. І., В'яткін Р. С.** Теоретичні підходи щодо визначення моніторингу використання земель об'єктів природно-заповідного фонду. Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст» ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, Харків. 2020. № 4(157). С. 72–78.

Рукопис подано до редакції 26.02.24

УДК 622.767.553

А.О. ХРУЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., М.О. ФРАНУЗО, аспірант  
Криворізький національний університет

## АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ СЕПАРАТОРІВ ДЛЯ ТОНКОДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета.** Проведення аналізу та розширення відомої класифікації існуючих конструкцій сучасних повітряних сепараторів для сухого поділу дисперсних матеріалів. Створення класифікації сучасного обладнання для пневматичного розділення та його подальший аналіз, дає змогу відділити оптимальний сепаратор, конструкція якого є найбільш перспективною для застосування при сухому поділі сировини та піддається збільшенню продуктивності за рахунок впровадження нових технічних рішень.

**Методи дослідження.** У роботі використано аналіз та узагальнення досвіду відомих досліджень, розробок та конструкцій повітряних сепараторів, що випускаються серійно, аналіз їх відомих класифікацій та особливостей конструкцій.

**Наукова новизна.** Визначено залежність ефективності розділення матеріалу від продуктивності розглянутих класів повітряних сепараторів, що випускаються серійно. Мінімальну продуктивність та ефективність поділу мають

гравітаційні сепаратори, що використовують тільки дві сили. Використання відцентрової сили та активного ротору у конструкціях повітряних сепараторів забезпечують найвищі показники продуктивності, керованості процесом сепарації, та ефективність розділення матеріалу.

**Практична значимість.** Доповнено та розширено відому класифікацію конструкцій сучасних повітряних сепараторів для сухого поділу дисперсних матеріалів. Запропоновано класифікація конструктивних елементів повітряних сепараторів на основі проведено аналізу відомих конструкцій та досвіду експлуатації.

**Результати.** Визначено раціональні конструктивні особливості повітряних сепараторів, що дозволяють забезпечити максимальну ефективність розділення, продуктивність та керованість процесом розділення, а саме використання відцентрової сили, активного ротору та зони циркуляції. Видокремлено основну проблему класу відцентрових сепараторів, пов'язану з нестабільністю їх роботи в наслідок перемішування (турбулізації) окремих потоків з різними швидкостями у зоні поділу, а також чутливості до зміни співвідношення повітря-тверде у матеріалі.

**Ключові слова:** повітряні сепаратори, класифікація повітряних сепараторів, відцентрові повітряні сепаратори, гравітаційні повітряні сепаратори, каскадні повітряні сепаратори, повітряні сепаратори із псевдозрідженим шаром, інерційні повітряні сепаратори.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-109-116

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Гірничозбагачувальні підприємства, технологічний процес на яких, в основному, ґрунтується на технологіях мокрого збагачення, розглядають можливість впровадження і технологій сухого збагачення мінеральної сировини. Застосування таких технологій є перспективним шляхом підвищення економічної ефективності переробки магнетитових руд за допомогою сухої магнітної сепарації тонкодисперсних матеріалів [4, 5].

Процес сухого збагачення є екологічно безпечнішим та економічно ефективнішим. Суттєва економія споживання технологічної води, відсутність необхідності фільтрації, згущення, висушування продуктів збагачення та потреби у ставках шламонакопичувачах – далеко не повний перелік переваг технології сухого збагачення. Відповідно до означених переваг, запровадження сухого методу збагачення у гірничодобувній промисловості у подальшому дозволить відмовитися від будівництва великих збагачувальних фабрик, суттєво зменшить використання технологічної води, спростить технологічні схеми збагачення, зменшить питомі капітальні та експлуатаційні витрати.

У випадку застосування технології сухого збагачення важливого питання набуває процес сухої класифікації дисперсних матеріалів [3, 4]. Таке обладнання для поділу дисперсних матеріалів широко застосовується у багатьох галузях промисловості, зокрема у металургійній, хімічній, сільськогосподарській, енергетичній та ін.

Основною перевагою пневматичної або повітряної сепарації є її висока ефективність поділу (особливо для матеріалів з високим вмістом пилоподібної фракції). Повітряна сепарація використовується, коли механічне розділення є ускладненим для поділу дрібних порошків (менше 100 мкм), але вона з успіхом використовується і для поділу матеріалів з частинками значно більшого розміру (1-25 мм) з можливістю зміни меж поділу вихідного продукту у процесі роботи [7].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Суха або повітряна сепарація – найбільш екологічно чистий та економічний процес. Сьогодні випускається широкий асортимент сепараторів сухого циклу, що працюють у ланцюзі з різноманітним обладнанням: циклонами, магнітними сепараторами сухого поділу, пиловловлювачами тощо.

У відомих роботах [2, 6, 8, 11, 13] було запропоновано декілька варіантів класифікації повітряних сепараторів. Розглянемо найцікавіші з них.

У роботі [13] пропонується систематизація конструкцій на основі використанням ними зон поділу, які розрізняються силами, що використовуються для забезпечення поділу матеріалу. До того ж у роботі наведено класифікацію основних схем сепараторів, у якій узагальнено найважливіші особливості їх конструкції. Попри наведений розгорнутий огляд конструкцій, не для усіх типів сепараторів наведені переваги, недоліки та основні параметри.

Грунтовний огляд існуючих конструкцій повітряних сепараторів, їх параметрів та особливостей роботи наведено у роботі [11]. Слід зазначити, що автори, поряд з іншим, приділили багато уваги опису конструкцій роторних відцентрових сепараторів, однак вони навели тільки конструкції таких сепараторів з позначенням деяких їх параметрів та особливостей конструкції, приділивши недостатньо уваги перевагам та недолікам кожної конкретної конструкції.

У книзі [8] автор наводить класифікацію сепараторів за конструктивним виконанням, що складається з 5 типів. Автор навів опис особливостей конструкцій сепараторів кожного типу, відзначив переваги та недоліки та навів технічні характеристики моделей сепараторів того часу.

У роботах [2, 6] охарактеризовано основні види повітряних сепараторів, але без узагальнюючої класифікації.

**Постановка задачі.** Аналіз та класифікація конструкцій сучасних повітряних сепараторів для сухого поділу дисперсних матеріалів.

**Викладення матеріалу та результати.** Створення класифікації сучасного обладнання для пневматичного розділення сепарації та його подальший аналіз, дає змогу відділити оптимальний сепаратор, конструкція якого є найбільш перспективною для застосування при сухому поділі сировини та піддається збільшенню продуктивності за рахунок впровадження нових технічних рішень.

На основі розглянутих вище наукових робіт та аналізу конструкцій повітряних сепараторів, що випускаються серійно, було розроблено класифікацію елементів їх конструкцій (рис 1).



Рис 1. Класифікація конструкцій повітряних сепараторів

Перша класифікаційна ознака, яка є дуже важливою, це сили, що використовуються при розділенні вихідного матеріалу. Загалом у конструкціях повітряних класифікаторів застосовуються 4 види сил для інтенсифікації поділу вихідного матеріалу. При чому у більшості конструкцій використовуються що найменше дві з них. Чим більше сил застосовується, тим більшою є продуктивність сепаратора. Але, як показує практика, найефективнішим є використання саме відцентрової сили, яка забезпечує найбільшу інтенсифікацію поділу та є добре контролюваною. Слід зазначити, що сила зіткнення часток матеріалу може бути як позитивним так і негативним фактором для збільшення ефективності поділу.

Другою визначальною ознакою конструкції сепараторів, що істотно впливає на ефективність процесу і фактично визначає загальну конструкцію самого сепаратора, є взаємне розташування векторів сил, що використовуються. Як зазначено у статті [13], найефективнішим є застосування саме схема з відцентрово-поперечним взаємним розташуванням векторів сил, яка характерна для найефективніших на сьогодні роторних повітряних сепараторів завдяки широкому діапазону регулювання динамічного впливу на матеріал.

Наступна ознака, запропонована тими ж авторами [13], визначає тип аеродинамічного циклу і, можна сказати, визначає ступінь вбудованості сепаратора у технологічний ланцюг. Як зазначають автори, сепаратори з внутрішнім циклом, які використовують рециркуляцію повітря та містять пилозбірники, вентилятори та трубопроводи в одному блоці і, отже, вимагають менше виробничих площ і, зазвичай, вимагають менші інвестиції. Натомість сепаратори із зовнішнім циклом, які побудовані незалежно від перелічених вище додаткових систем є простішими

за конструкцією, але комплектування ділянки усіма необхідними технологічними апаратами може з рештою вимагати більших коштів.

Спосіб подачі матеріалу у сепаратор може впливати на сталість його режиму роботи. Зазвичай у сепаратор надходить уже готова суміш повітря з матеріалом напряму від, наприклад, відцентрової дробарки ударної дії. Недоліком такого способу подачі є несталість співвідношення повітря та твердого у такій суміші. Застосування роздільної подачі дає змогу точно контролювати склад суміші, а отже і сталості режиму роботу сепаратора, але, у свою чергу, вимагає додаткового обладнання для попереднього знепилення повітря після подрібнення.

Напрямок подачі матеріалу та розвантаження готових продуктів у проаналізованих конструкціях сепараторів, в основному, залежить від взаємного розташування векторів сил, що використовуються. Так для гравітаційно-протитічної схеми поєднання векторів характерна подача матеріалу зверху або знизу у камеру розділення сепаратора, для гравітаційно-перехресної схеми характерною є горизонтальна або верхня подача матеріалу, для відцентрово-протитічної схеми характерною є подача знизу або тангенційна горизонтальна подача, для відцентрово-поперечної схеми часто застосовується подача знизу, рідше тангенційна горизонтальна подача. У переважній більшості конструкцій розвантаження дрібної фракції відбувається з потоком повітря вгору, а крупної фракції – униз, що зумовлено, серед іншого використання сили тяжіння, як додаткового фактору поділу матеріалу.

Розглянемо класифікацію повітряних сепараторів, наведених у роботі [13] (рис. 2) та доповнимо її, вказавши область використання, переваги, недоліки та основні параметри для кожної групи сепараторів.

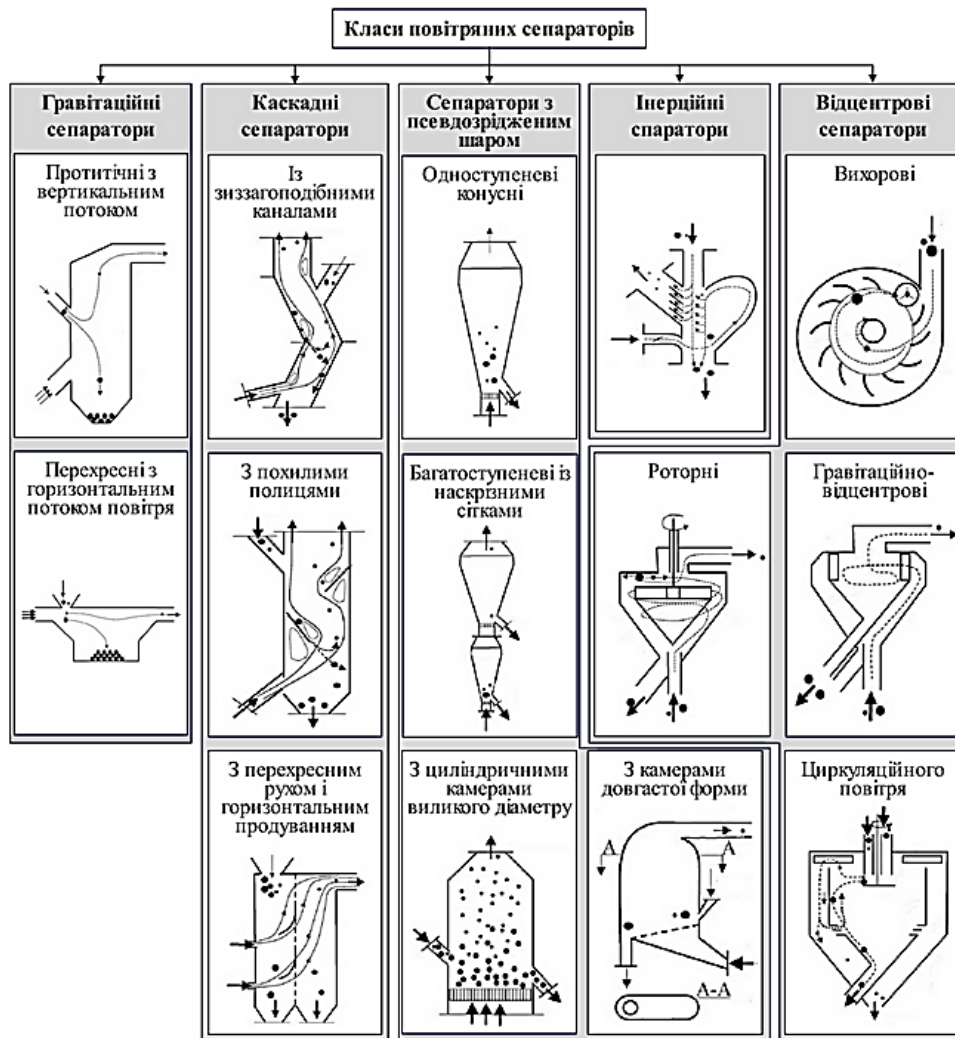


Рис. 2. Класифікація повітряних сепараторів, згідно [13]

Клас гравітаційних сепараторів використовує сили тяжіння та сили аеродинамічного опору для поділу матеріалу і складається з 2-х типів.

*Протитічні сепаратори з вертикальними (висхідними) потоками.* Область використання: поділ грубих сипких матеріалів, що містять два типи частинок, розміри яких сильно різняться. Використовується гравітаційно-протитічне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: прості за конструкцією та відносно дешеві. Недоліки: крупні частинки матеріалу порушують однорідність повітряного потоку і ускладнюють рух дрібних частинок у повітряному потоці, що у свою чергу, знижує загальну ефективність поділу матеріалу [2, 13].

*Перехресні сепаратори з горизонтальним потоком повітря або віялки.* Область використання: поділ твердих частинок за щільністю, а не за розміром (наприклад, очистка зерна від шкірки). Використовується гравітаційно-перехресне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: відсутність рухомих частин; мінімальне обслуговування; відсутність потреби у додатковій пиловловлюючій апаратурі; відсутні викиди відпрацьованого повітря в атмосферу. Недоліки: на ефективність роботи мають суттєвий вплив стохастичні фактори процесу, зокрема невизначеності у живленні та аеродинамічних взаємодіях частинок [13].

Клас каскадних сепараторів, як і попередній, використовує сили тяжіння та сили аеродинамічного опору для поділу матеріалу і складається з 3-х типів.

*Каскадний сепаратор з декількома похилими патрубками прямокутного перерізу, що утворює вертикальний зигзагоподібний канал.* Область використання: поділ залізної руди, різноманітних добрив, пластику, пилу деревини, при збагаченні слюдяної руди тощо з крупністю частинок від 0,1 до 10 мм. Використовується гравітаційно-протитічне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: множинне очищення, яке значно підвищує ефективність поділу. Недоліки: перемішування крупних і дрібних частинок знижує ефективність поділу; високий аеродинамічний опір [12, 13].

*Каскадний сепаратор з декількома похилими полицями на внутрішніх стінках основного каналу.* Область використання: розділення дрібного щебеню, будівельних пісків, мінеральних наповнювачів абразивних порошоків із відсіву дроблення з крупністю частинок від 0,06 – 7 мм. Використовується гравітаційно-протитічне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: перфоровані полиці збільшують інтенсивність контакту фаз, що забезпечує місцеве збільшення швидкості та турбулентності потоку. Недоліки: сильна турбулентність, що утворюється під полицями, призводить до високих перепадів тиску (до 4–5 кПа) та високої енерговитратності цих пристроїв; висока чутливість до вихідної вологості сировини (до 3%) [12, 13].

*Каскадний сепаратор із перехресним рухом, горизонтальним продуванням у вертикальній ємності,* розділений на сепараційну та осадову камери, які, в свою чергу розділені проникними ґратами з увігнутими полицями. Область використання: поділ подрібненої фосфатної руди фракцією 1 мм. Використовується гравітаційно-перехресне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: практично виключає зіткнення частинок у зоні сепарації, що значно покращує ефективність поділу; завдяки зниженню завихреності, опір повітря та енергоспоживання нижче; не потребує складного сервісного обслуговування; відсутні системи змащення і деталі, що зношуються. Недоліки: в просторі між нижньою кромкою полиці та протилежною їй стінкою шахти утворюється вихроподібний рух матеріалу тільки навколо однієї горизонтальної осі [5, 7, 9, 12, 13].

Клас сепараторів із псевдозрідженим шаром, як і попередні, використовує сили тяжіння та сили аеродинамічного опору для поділу матеріалу і складається з 4-х типів.

*Одноступеневі конусні сепаратори з псевдозрідженим шаром.* Область використання: сушіння дрібнозернистих, пастоподібних та рідких матеріалів, гранулювання, змішування матеріалів з розміром часток від 0,03 до 6 мм. Використовується гравітаційно-протитічне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: легкий контроль та керування процесом розділення; простота конструкції. Недоліки: не підходить для розділення декількох матеріалів з різною щільністю; обмеження на розмір частинок матеріалу; занадто енергоємні [2, 4, 11, 13].

*Багатоступеневі сепаратори із наскрізними сітками.* Область використання: не знайшли широкого застосування на практиці головним чином через їх великий розмір. Використовується гравітаційно-протитічне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Пере-

ваги: легкий контроль та керування процесом розділення; висока ефективність розділення через багатостадійність, простота конструкції. Недоліки: великі габаритні розміри; дроблення частинок в результаті ударів о сітку може вплинути на якість продукту; занадто енергоємні [23].

*Сепаратори з циліндричними камерами великого діаметру.* Область використання: розділення піску, хлориду калію та фосфатів з розміром частинок від 50 мкм до 1,5 мм. Використовується гравітаційно-протитічне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: легкий контроль та керування процесом розділення; виключення переподібнення; простота конструкції. Недоліки: циліндрична камера великого діаметра сприяє утворенню мертвих зон всередині киплячого шару далеко від вісі, де частинки не рухаються; занадто енергоємні [4, 11, 12, 13].

*Сепаратори з камерами довгастої (овальної) форми.* Область використання: розділення піску, хлориду калію та фосфатів з розміром частинок від 50 мкм до 1,5 мм. Використовується гравітаційно-перехресне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: хороша стабільність роботи у широкому діапазоні подачі; повністю виключені мертві зони всередині киплячого шару; сітка змінного розміру дозволяє контролювати швидкість викиду грубих часток. Недоліки: не підходить для матеріалів, які легко прилипають до стіни; занадто енергоємні; стирання та подрібнення твердих частинок [7, 12, 13].

Клас інерційних повітряних сепараторів використовує сили тяжіння та сили аеродинамічного опору для поділу матеріалу. Область використання: розділення дрібнодисперсних порошків з розміром частинок від 40 до 400 мкм). Використовується гравітаційно-перехресне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: простота конструкції; немає рухомих частин; висока точність сепарації; невеликі енерговитрати. Недоліки: потік вторинного повітря заважає первинному потоку, що викликає переміщення дрібних частинок в криволінійній камері для змішування з матеріалом у живленні [2, 12, 13].

Клас відцентрових повітряних класифікаторів використовує відцентрову силу і силу аеродинамічного опору для поділу матеріалу і складається з 4 - типів.

*Вихрові повітряні класифікатори.* Область використання: широко використовується для розділення дрібних порошків абразивних матеріалів з крупністю часток від 38 до 150 мкм. Використовується відцентрово-протитічне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: висока надійність та стабільність роботи; низьке енергоспоживання та висока продуктивність; легке технічне обслуговування; можливість обробки абразивних матеріалів; висока ефективність уловлювання тонкодисперсного пилу; можливість регулювання процесу сепарації. Недоліки: відсутність можливості збільшення часу взаємодії важких частинок з повітряним потоком; порушення співвісності потоку з віссю обертання ротаційного розкидача при зміні дозування; необхідність додаткового пристрою для дуття вторинного повітря; у разі використання в якості вторинного атмосферного повітря - підвищення загального обсягу газів, що проходять через апарат; підвищена складність експлуатації апарату [1, 5, 6, 11, 13].

*Гравітаційно-відцентрові повітряні класифікатори.* Область використання: для вилучення асбесту, на цементних та вугільних комбінатах для розділення матеріалів з розміром частинок від 10 до 100 мкм. Використовується відцентрово-поперечне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: порівняно висока ефективність та чіткість розділу сепарованих матеріалів; відсутність потреби у додатковій пиловловлюючій апаратурі; простота конструкції; надійність; легкість в регулюванні; висока продуктивність при відносно малих розмірах. Недоліки: видача грубих продуктів з наявністю в них дрібних фракцій; можливість порушення процесу сепарації через перезволоження повітря; не можливість досягнення високої чіткості розділення матеріалу за граничним зерном; необхідність наявності у схемі подрібнення апаратів для тонкого очищення великих обсягів повітря [1, 2, 6, 11, 13].

*Роторні сепаратори.* Область використання: використовуються для сепарації дрібнозернистих порошків з розміром частинок 20-100 мкм. Використовується відцентрово-поперечне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: широкі межі регулювання розмірів частинок готових продуктів завдяки регулюванню швидкості обертання ротора. Недоліки: можливість порушення процесу сепарації через перезволоження повітря при класифікації матеріалів з підвищення вологості [1, 2, 6, 11, 13].

*Класифікатори циркуляційного повітря.* Область використання: у цементній промисловості, для одержання високоякісних наповнювачів, пігментів, високомарочних цементів, мікрота-

льку та інших матеріалів з крупністю часток від 5 до 100 мкм. Використовується відцентрово-протитічне поєднання векторів сили тяжіння та сили аеродинамічного опору. Переваги: надійність роботи; простота обслуговування; високі показники якості готових продуктів; не вимагають складного технічного обслуговування. Недоліки: досить погане відокремлення пилу від повітря у проміжній зоні, що призводить до накопичення частинок, що знижує їхню ефективність [1, 2, 6, 11, 13].

Грунтуючись на технічних характеристиках розглянутих вище класів повітряних класифікаторів, що випускаються серійно, виокремимо основні параметри, такі як продуктивність та ефективність розділення матеріалу, та представимо їх у виді графіка залежності ефективності розділення матеріалу від продуктивності для різних типів розглянутих повітряних сепараторів (рис. 3).

З наведеного графіка (рис. 3) видно, що мінімальну продуктивність та ефективність поділу мають гравітаційні сепаратори, що використовують тільки дві сили.

Повітряні сепаратори, у конструкціях яких використовуються відцентрова сила та активний ротор, мають найвищі продуктивність та якість розділення. До того ж вони мають глибоку ступінь регулювання процесу розділення. Причому сепаратори циркуляційного повітря мають найкращі показники.

Для сепараторів, що використовують для інтенсифікації поділу матеріалу відцентрову силу, додатковою важливою ознакою конструкції є наявність ротору з лопатями.

Усі низькопродуктивні конструкції сепараторів не мають ротора як такого, тобто не використовують відцентрову силу взагалі (наприклад гравітаційні, каскадні сепаратори та сепаратори псевдозрідженого стану), або використовують з низькою ефективністю (аероциклони). Більшу продуктивність та ефективність мають сепаратори, що використовують відцентрову силу та мають у своїй конструкції статично встановлені лопаті, що сприяють завихоренню потоку повітряно-пилової суміші. І, нарешті, максимальну продуктивність, ефективність та керованість процесу розділення мають сепаратори з ротором, що обертається.

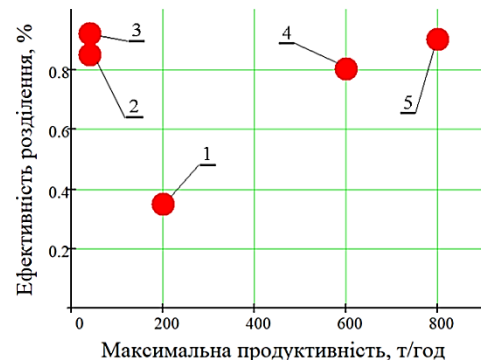
Таким чином, можна стверджувати, що використання у конструкціях повітряних сепараторів відцентрової сили при відцентрово-протитічному поєднанні векторів діючих сил та з ротором, що обертається забезпечує максимальні продуктивність та ефективність розділення матеріалу. Це твердження підтверджено у науковій роботі [10].

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** У результаті проведеного аналізу доповнено та розширено відомі класифікації конструкцій сучасних повітряних сепараторів для сухого поділу дисперсних матеріалів. Запропонована класифікація конструктивних елементів повітряних сепараторів на основі проведеного аналізу відомих конструкцій, а також доповнена відома [13] на основі досвіду експлуатації. Встановлено, що використання відцентрової сили та активного ротору у конструкціях повітряних сепараторів забезпечують найвищі показники продуктивності та керованості процесом сепарації, а додавання зони циркуляції значно підвищує ефективність розділення матеріалу.

Проте все ще не розв'язаною залишається основна проблема усього класу відцентрових сепараторів, пов'язана з нестабільністю їх роботи в наслідок перемішування (турбулізації) окремих потоків з різними швидкостями у зоні поділу, а також чутливості до зміни співвідношення повітря-тверде у матеріалі, що надходить у живлення.

#### Список літератури

1. Жидков В.В. Совершенствование процесса разделения тонкодисперсных порошков в классификаторе центробежного типа: дисерт. на соискание учен. степ. канд. тех. наук по спец 05.02.13 -Машины, агрегаты и процессы (строительство). – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. – 215 с.



**Рис 3.** Залежність ефективності розділення матеріалу від продуктивності для різних класів повітряних сепараторів: 1 – гравітаційні сепаратори; 2 – каскадні сепаратори; 3 – сепаратори з псевдозрідженим шаром; 4 – інерційні повітряні сепаратори; 5 – відцентрові повітряні сепаратори

2. Жихар Г. И. Котельные установки тепловых электростанций: учеб. пособие. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 523 с.
3. Машины и аппараты химических производств: Учебное пособие для вузов/ А.С.Тимонин, Б.Г.Балдин, В.Я. Борщев, Ю.И. Гусев и др. / Под общей редакцией А.С.Тимонина.-Калуга: Издательство Н.Ф.Бочкаревой, 2008.- 872с.
4. Ніколаєнко К. В. Технологія сухого збагачення техногенної сировини у вигляді некондиційних гематитових руд, для отримання з них концентрату з вмістом заліза не менше 62,0% / К. В. Ніколаєнко, С. О. Червоний, П. К. Ніколаєнко // Збагачення корисних копалин: науково-технічний збірник. – Дніпро, 2016. – Вип. 63 (104).-С.65-68
5. Олійник Т.А. Перспективи розвитку технологій збагачення залізних руд // Збагачення корисних копалин, 2018. - Вип. 69(110).-С.32-44
6. Рагозина Н.М., Макаренко Д.А., Четвертаков Г.В. Переработка и утилизация дисперсных материалов и твердых отходов.-М.:Альфа-М, 2013.-464 с.
7. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности.- М: "Химия", 1977.-368 с.
8. Смышляев Г.К. Воздушная классификация в технологии переработки полезных ископаемых.-М.: Изд-во «Недра», 1969.- 101 с.
9. Техніка та технологія збагачення корисних копалин: [навч. посібник]. Ч. 2 : Основні процеси / В. С. Білецький, Т. А. Олійник, В. О. Смирнов, Л. В. Скляр. – Кривий Ріг : ФОП Чернявський Д.О., 2019. – 212 с.
10. Шарапов Р.Р. Совершенствование процесса разделения в воздушном центробежном сепараторе: дисерт. на соискание учен. степ. канд. техн. наук по спец 05.02.13-Машины, агрегаты и процессы (строительство и ЖКХ). – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. – 158 с.
11. Ivan V. Klumpar, Fred N. Currier, Terry A. Ring. Air Classifiers // Chemical Engineering, 1986.- march, 3.- pp.77-92.
12. Kaiser F. Der Zickzack-Sichter – ein Windsichter nach neuen Prinzip // Symposium Zerkleinern Chemie GmbH.- Weinheim, 1963.-pp.587-605
13. Shapiro M., Galperin V. Air classification of solid particles: a review // Chemical Engineering and Processing, 2005.- vol. 44.- pp. 279–285.

Рукопис подано до редакції 20.03.24

УДК 621.311

Ю.В. ШЕРСТНЬОВ, аспірант, Ю.Г. ОСАДЧУК, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

## РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ РІВНІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПІДСТАНЦІЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ

**Мета роботи.** Розробити алгоритм компенсації реактивної потужності підстанції для зменшення її впливу на електромережу. Передбачається встановлення компенсуючих пристроїв і за допомогою розробленого алгоритму оптимізувати режими їх комутацію. Це дозволить знизити витрати на енергоспоживання, збільшити ефективність та надійність роботи електромережі.

**Методи досліджень.** Проведено аналіз добових рівнів споживання електричної енергії споживачами підстанції за літній та зимовий місяці, проаналізовано рівні навантаження синхронних двигунів. За допомогою теоретичного аналізу та узагальнення результатів досліджень за стандартними та новими методиками розроблено алгоритм роботи системи компенсації та складені нечіткі правила для неї. Виконано моделювання інтелектуальної системи керування споживачами електричної енергії (ФКП та СД).

**Наукова новизна.** Виконано моделювання системи нечіткого керування, із використанням реальних даних про рівні споживання електричної енергії споживачами підстанції гірничо-збагачувального комбінату. Запропонована система дозволяє враховувати необхідні показники для оптимізації рівнів реактивної потужності для досягнення високих показників енергетичної ефективності.

**Практична значимість.** Споживачі електроенергії підстанцій гірничо-металургійного комплексу часто мають нелінійні характеристики навантаження. Наявність напівпровідникових перетворювачів призводить до погіршення якості живлення через наявність вищих гармонійних складових напруги і струму [1, 2], підвищується сплата підприємством за електричну енергію [15]. Таким чином, оператор мережі змушений впроваджувати заходи з компенсації реактивної потужності [8, 9]. Але системи керування, із за невизначеності характеру навантаження та збурень, можливості перекомпенсації, потребують більш складних підходів по реалізації на етапі проектування але простіших дій в подальшій експлуатації. Таке керування може здійснювати система на базі нечіткої логіки.

**Результати.** На прикладі добового споживання електричної енергії наведено результати комп'ютерного моделювання процесу компенсації реактивної потужності на прикладі реальних показників споживання електричної енергії потужних підстанцій гірничо-збагачувального комбінату. Проведено аналіз ефективності використання принципу нечіткого керування. Для тестування авторами були використані експериментальні дані за січень та чер-