

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
НАЦІОНАЛЬНОГО ГІРНИЧОГО УНІВЕРСИТЕТУ
№ 82**

**Дніпро
2025**

УДК 622 (06)

Засновник та видавець

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Рік заснування – 1999

Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2025 – № 82 – 332 с.

Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень з різних аспектів гірничої справи, розглянуто проблеми розробки родовищ корисних копалин, охорони праці і безпеки робіт на гірничих підприємствах, проблеми технологій захисту навколишнього середовища, геології, електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, матеріалознавства і галузевого машинобудування, прикладної механіки, будівництва та цивільної інженерії, нафтогазової інженерії та технологій, висвітлені питання експлуатації гірничотранспортного устаткування на шахтах, рудниках і кар'єрах, представлені дослідження з автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки.

Матеріали збірника призначені для наукових та інженерно-технічних працівників, які спеціалізуються в галузі гірничої справи.

Збірник друкується за рішенням вченої ради НТУ «Дніпровська політехніка» (протокол № 16 від 29.10.2025 р.)

Комп'ютерна верстка і набір – **А.А. Адамчук**, канд. техн. наук

Збірник зареєстровано в

Національній раді України з питань телебачення і радіомовлення.

Рішення № 1876 від 30.05.2024 р.

© Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2025

ЗМІСТ

ГІРНИЦТВО

1. **Б.Ю. Собко, Є.І. Сальник** Дослідження несучої здатності гірських порід при виборі гірничотранспортного обладнання для розробки розсипів..... 7
2. **А.В. Аблець, В.В. Тронь** Гібридне монотонне моделювання ефективності гідроциклону для цільового керування тонкістю поділу..... 16
3. **Н.В. Зуєвська, В.Ю. Берездецький, Е. Шукюрлю** Чисельне моделювання піщаної та пінної забивки для підвищення ефективності дроблення золотовмісних кварцитів..... 29
4. **О.В. Малоок** Фактори, що впливають на продуктивність екскаваторів при розробці бурштину з використанням напівмобільного збагачувального устаткування..... 44
5. **В.В. Руських, О.А. Гайдай, І.В. Філіппов, С.М. Пойманов** Конструкція ресурсозберігаючої системи кріплення підготовчих виробок..... 55
6. **В.В. Соколов, М.М. Кононенко, О.Є. Хоменко, А.В. Косенко** Математичне моделювання зони зминання масиву свердловинним зарядом вибухової речовини за ударною адіабатою породи..... 65
7. **В.А. Цопа, А.В. Павличенко, С.І. Чеберячко, Т.О. Білько** Розробка ієрархії небезпечних чинників психосоціальних ризиків в системах управління охорони здоров'я та безпеки праці гірничих підприємств..... 81
8. **О.Л. Шепель** Методика дослідження напружено-деформованого стану масиву аналітичними методами при переході з технологій відкритого видобутку на технології відкрито-підземного видобутку залізорудної сировини..... 95

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

9. **В.В. Ішков, К.М. Колчев, О.С. Дрешпак, Є.С. Козій, В.М. Мандрікевич** Еволюція використання торфу для енергетичних потреб: від вогнищ палеоліту до біорефайнінгу ХХІ століття..... 107
10. **В.М. Логвін, П.Г. Пігулевський, С.О. Яремій** Застосування диференційних характеристик при аналізі даних вертикального електричного зондування..... 120
11. **Л.М. Рудаков, І.В. Чушкіна, О.В. Орлінська, Д.С. Пікареня** Геологічні та тектонічні фактори впливу на технічний стан гідротехнічних споруд цивільного призначення..... 129
12. **Д.В. Рудаков, Ю.М. Битько** Статистичний аналіз гідрологічних процесів в басейні р. Самара в умовах кліматичних змін..... 139
13. **С.В. Шевченко, О.В. Курса, С.А. Кріпак** Бурштин як об'єкт геологічної і культурної спадщини: європейський досвід і перспективи для України..... 150

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

14. **К.С. Заболотний, О.В. Анциферов, С.С. Гавриленко** Особливості динаміки грохота з просторовими коливаннями робочого органа..... 165

15. **С.О. Федоряченко, К.А. Зіборов, Д.В. Лаухін, В.М. Король, Д.В. Гаркавенко** Теоретичне обґрунтування ефективної тріщиностійкості металевих сплавів циліндричних оболонок..... 175
16. **А.О. Хруцький, М.О. Франузо** Системний аналіз конструктивних особливостей повітряних відцентрових класифікаторів та перспективи їх вдосконалення..... 183

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

17. **Б.І. Мороз, Ю.А. Папайка, Є.В. Кошеленко, М.В. Луценко, Б.В. Макаrchук** Інформаційне забезпечення функціонування енергосистеми з розподіленою генерацією..... 196
18. **Г.Г. Півняк, О.О. Азюковський, І.М. Луценко, О.О. Запишний, Г.В. Власенко** Концептуальні принципи відновлення енергетики України..... 207
19. **А.В. Чернявський, О.В. Бориченко, В.Ф. Находов, Ю.В. Шишко** Адаптація аналітичного інструментарію систем енергоменеджменту промислових підприємств України у відповідності до вимог міжнародних стандартів..... 219

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

20. **В.А. Дербаба, С.В. Алексеєнко, А.А. Хлинін, Д.І. Луценко** Комбінована механічна обробка деталі на верстаті з програмним керуванням і оптимізацією режимних параметрів..... 231

НАФТОГАЗОВА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

21. **В.О. Расцветаєв, Д.О. Васильченко** Технологічні та енергетичні переваги індукційного нагріву в системах транспортування нафти трубопроводами.. 246

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

22. **І.В. Давидова, В.В. Мельник-Шамрай, А.В. Панасюк, А.М. Махно** Використання картографічних матеріалів під час оцінки впливу на довкілля..... 258
23. **Р.О. Дичковський, І.О. Мірошников, А.Ю. Перерва** Синтез гумату калію як спосіб екологічної переробки відходів вуглезбагачення 274
24. **О.М. Назаренко, А.О. Березовська, Є.І. Буякова, А.В. Башкіров, Є.А. Шерстюк** Обґрунтування будівництва рекреаційних водоймищ як інструментарій екосистемних послуг смарт міста..... 288
25. **П.Б. Сайк, О.О. Дмитрук, Н.Р. Лисий** До питання утилізації вуглецевмісних відходів гірничого виробництва..... 296
26. **В.В. Сорока** Дослідження процесів утворення металовмісних відходів в умовах сталепрокатного виробництва..... 309

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОВІТРЯНИХ ВІДЦЕНТРОВИХ КЛАСИФІКАТОРІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВДОСКОНАЛЕННЯ

А. Khrutskyi¹, <https://orcid.org/0000-0002-9332-1748>

М. Franuzo¹ <https://orcid.org/0009-0003-4354-0875>

¹Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

SYSTEM ANALYSIS OF DESIGN FEATURES OF AIR CENTRIFUGAL CLASSIFIERS AND PROSPECTS FOR THEIR IMPROVEMENT

Мета. Провести системний аналіз і узагальнення конструктивних особливостей повітряних відцентрових класифікаторів динамічної дії для виявлення типових і рідкісних параметрів, взаємозв'язків та закономірностей їх геометричної й функціональної еволюції з метою формування рекомендацій щодо проектування, модернізації та вибору обладнання для класифікації дрібно- та наддрібнодисперсних матеріалів.

Методика. Досліджено 68 конструкцій, описаних 10 параметрами. Для зниження розмірності та візуалізації застосовано метод головних компонент (PCA), для виділення груп – кластеризацію DBSCAN. Побудовано дерево еволюції робочого органу – потоку повітря.

Результати. Проведений системний аналіз та узагальнення конструктивних особливостей повітряних відцентрових класифікаторів динамічної дії. При цьому визначено, що найпоширеніші повітряні відцентрові класифікатори динамічної дії мають: вертикальну вісь (92,6%), циліндричний корпус (86,8%), динамічні лопаті (66%). Типові комбінації охоплюють ≤16% моделей, що свідчить про різноманітність. Дві головні компоненти пояснюють 71,04% дисперсії. DBSCAN виділив 4 групи та одну атипову конструкцію. Виявлено кореляції: циркуляція повітря завжди супроводжується плоскими обертовими лопатями; горизонтальні моделі мають лише відцентрові колеса або їх відсутність; статичні – без додаткового повітря. Виділено дві перспективні конструкції – існуючу (равликоподібний корпус, вертикальна вісь) та гіпотетичну (равликоподібний корпус, горизонтальна вісь). Дерево еволюції показує розвиток робочого органу відцентрових повітряних сепараторів.

Наукова новизна. Вперше виконано комплексний багатовимірний аналіз класифікаторів із застосуванням PCA та DBSCAN, систематизовано конструкції та закономірності їх еволюції, запропоновано дерево розвитку робочого органу.

Практична значимість. Оптимізація конструкцій дозволяє підвищити ефективність, зменшити енергоспоживання та знос, інтегрувати рекомендації у CAD/CAM-системи та використовувати як базу для CFD-моделювання.

Ключові слова: збагачення корисних копалин, повітряні відцентрові класифікатори, параметри відцентрових класифікаторів, частотна діаграма параметрів, зниження розмірності, кластеризація, системний аналіз, дерево еволюції, потік повітря.

Вступ. Ефективне розділення дрібнодисперсних матеріалів є необхідним у переробці мінеральної сировини, металургії, хімічній промисловості, будівництві, енергетиці та аграрному секторі. Серед методів класифікації особливе місце посідає суха повітряна класифікація, що реалізується відцентровими класифікаторами. Вони забезпечують точне регулювання крупності продукту, високу продуктивність і низькі експлуатаційні витрати завдяки взаємодії відцентрових сил, сили тяжіння та аеродинамічного опору, а також широкому діапазону налаштувань шляхом зміни частоти обертання робочого колеса, параметрів потоку, форми корпусу та способу живлення.

Незважаючи на різноманіття конструкцій, існує потреба у системному аналізі для виявлення переваг, взаємозв'язків між параметрами та ефективністю, а також уніфікації підходів до їх класифікації. У науково-технічній літературі, наприклад [1–13], широко висвітлюються теоретичні, експериментальні та CFD-дослідження, спрямовані на підвищення селективності, розширення діапазону фракцій [14–16], зменшення енергоспоживання [17–19] та зносу елементів [20–22]. Однак відсутність узагальненої систематики конструкцій та тенденцій їх еволюції створює методологічну прогалину, що ускладнює оптимізацію обладнання для конкретних умов. Це визначає актуальність подальшого узагальнення досвіду та розробки рекомендацій з проектування й модернізації повітряних класифікаторів.

Постановка задачі. Системний аналіз та узагальнення конструктивних особливостей повітряних відцентрових класифікаторів динамічної дії з метою виявлення їх типових параметрів, взаємозв'язків між ними, а також встановлення закономірностей розвитку їх конструкцій задля формування основних рекомендацій щодо проектування, модернізації та вибору ефективного класифікаційного обладнання для переробки дрібнодисперсних матеріалів і подальшої оптимізації конструкції.

Викладення основного матеріалу. Під час аналізу було розглянуто 68 конструкцій відцентрових повітряних класифікаторів, з яких видокремлено набір з 10 параметрів конструкції, на основі якого характеризувалася кожна розглянута конструкція:

- вісь класифікатора – орієнтація осі корпусу класифікатора у просторі; варіанти: горизонтально або вертикально;
- форма корпусу – форма робочої частини корпусу класифікатора; варіанти: циліндрична, равликоподібна, конусна.
- вид робочого колеса – наявність і форма робочого колеса у конструкції класифікатора; варіанти: без колеса; осьове, відцентрове (типу біляча клітка);
- тип лопатей – визначає рухомість або нерухомість лопатей, причому рухомі (динамічні лопаті) створюють потік повітря, а нерухомі (статичні) – використовують зовнішні джерела; варіанти: динамічні, статичні, без лопатей;
- характер живлення – визначає як подається вихідний матеріал у класифікатор – разом з основним повітрям, як суміш або окремо; варіанти: суміш, окремо;

- напрям живлення – визначає звідки подається матеріал у класифікатор; варіанти: зверху, дотично зверху; дотично збоку; збоку, знизу, дотично знизу;
- напрям розвантаження тонкого продукту – напрям вивантаження відсепарованих дрібних зерен; варіанти: вгору, убік, зверху убік; униз;
- напрям розвантаження грубого продукту – напрям вивантаження відсепарованих грубих зерен; варіанти: униз, дотично убік;
- напрям основного повітря – напрям подачі основного потоку повітря у класифікатор; варіанти: дотично зверху, дотично збоку; збоку; знизу; циркуляція всередині;
- напрям додаткового повітря – наявність і напрям допоміжного повітря; варіанти: немає; знизу; дотично збоку.

На рис. 1 наведено діаграму, яка показує частоту застосування вказаних вище параметрів у розглянутих конструкціях класифікаторів.

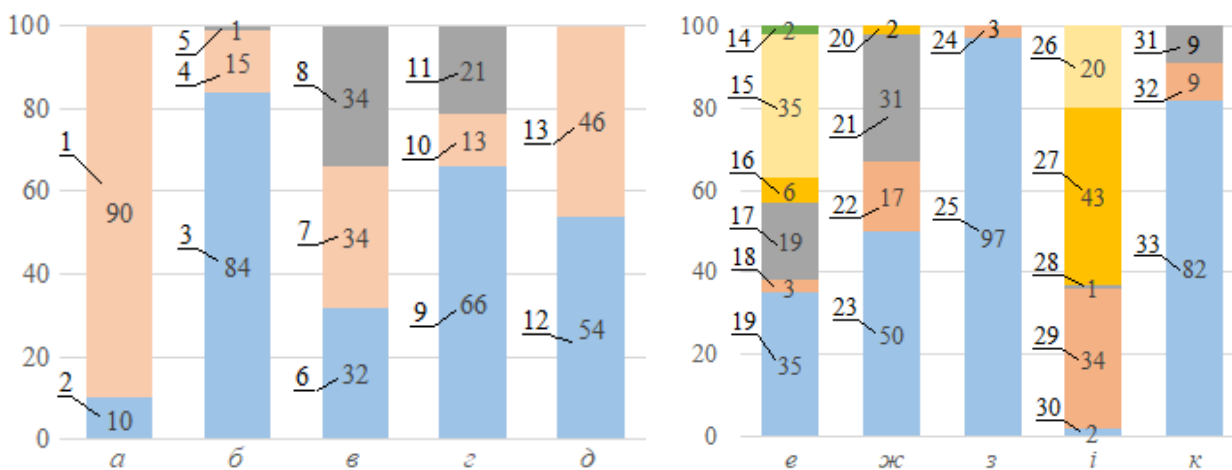


Рис. 1. Відсоткова частотна діаграма параметрів повітряних відцентрових класифікаторів: а – розташування осі корпусу; 1 – вертикальна; 2 – горизонтальна; б – форма корпусу; 3 – циліндрична; 4 – равликopodobна; 5 – конічна; в – вид робочого колеса; 6 – відцентрове; 7 – осьове; 8 – без колеса; г – тип лопатей; 9 – динамічні; 10 – статичні; 11 – без лопатей; д – характер живлення 12 – суміш; 13 – окреме; е – напрям живлення; 14 – дотично знизу; 15 – знизу; 16 – збоку; 17 – дотично збоку; 18 – дотично зверху; 19 – зверху; ж – напрям розвантаження тонкого продукту; 20 – дотично зверху; 21 – униз; 22 – убік; 23 – вгору; з – напрям розвантаження грубого продукту; 24 – дотично убік; 25 – униз; і – напрям основного повітря; 26 – циркуляція всередині; 27 – знизу; 28 – збоку; 29 – дотично збоку; 30 – дотично зверху; к – напрям додаткового повітря; 31 – знизу; 32 – дотично збоку; 33 – немає

Аналіз показав, що у 92,6% класифікаторів корпус має вертикальну вісь [8] та циліндричну форму (86,8%) [18]. Конструкції робочого колеса розподіляються майже порівну між відцентровими (32%) [7], осьовими (34%) [15] та варіантами без колеса (34%) [6]. Динамічні лопаті притаманні 66% моделей [3]. Живлення

здійснюється як сумішню (50%) [10], так і окремо (50%) [5], причому найпоширенішими напрямками подачі є зверху [1] та знизу [22] (по 35,3%). Тонкий продукт зазвичай розвантажується вгору (50%) [20] або вниз (31%) [5], тоді як грубий продукт у переважній більшості (97%) — вниз [11]. Основне повітря найчастіше подається знизу (42,6%) [10] або дотично збоку (34%) [6], а додаткове повітря у 82,3% випадків взагалі не використовується [13].

Найпоширенішою виявилася комбінація параметрів: циліндричний корпус з вертикальною віссю, динамічне осьове колесо, завантаження матеріалу окремо зверху, розвантаження як тонких, так і грубих зерен униз, циркуляція повітря всередині без подачі додаткового повітря — таку конфігурацію мають 16,2% конструкцій [15]. Дещо рідше, у 10,3% випадків, застосовується циліндричний корпус з вертикальною віссю без колеса, при якому матеріал у суміші з повітрям подається знизу, тонкі зерна відводяться вгору, а грубі — вниз, також без додаткового повітря [15]. Ще 7,4% моделей виконано у вигляді циліндричного корпусу з вертикальною віссю без колеса, з подачею матеріалу у суміші з повітрям дотично збоку, при цьому тонкий продукт розвантажується вгору, а грубий — униз [6]. Також у 7,4% класифікаторів з осьовим розташуванням лопатей передбачено живлення матеріалу у суміші з повітрям, що є відносно рідкісним рішенням [10].

Слід відзначити, що частка кожної з найбільш типових комбінацій — не перевищує 16%, тобто класифікатори доволі диференційовані за конструкціями.

Проведемо візуальний аналіз конструкцій відцентрових повітряних класифікаторів. Оскільки кожна конструкція описується 10 параметрами, для відображення багатовимірних даних у дво- чи тривимірних координатних системах застосовують методи зменшення розмірності. Вони знижують кількість змінних, виявляючи основні параметри, з частковою втратою первинної інформації [19].

Серед таких методів метод головних компонент (РСА) вирізняється простою реалізацією та здатністю виявляти основні напрями відмінностей між конструкціями. Він також дозволяє оцінити пояснюваність дисперсії, тобто частку загальної варіативності, яку описує кожна компонента, та її значущість для відображення структури даних [19].

Результати роботи метода головних компонент (РСА) наведена на рис. 2, причому пояснена дисперсія кожної компоненти становить для компоненти 1: 0.5013 (50.13%), для компоненти 2: 0.2090 (20.90%). Сумарна пояснена дисперсія (компонента 1 + компонента 2) становить 0.7104 (71.04%).

Наступним етапом проведемо кластеризацію даних для виявлення прихованих структур і закономірностей. Цей підхід розділяє об'єкти на групи зі схожими характеристиками та значними відмінностями між ними, що особливо важливо за відсутності заздалегідь визначених категорій. Кластеризація спрощує аналіз, виявляє взаємозв'язки та підвищує точність подальших досліджень.

Серед різних методів виділяють алгоритми розподілу, зокрема K-Means, який ділить дані на задану кількість кластерів, та методи на основі густини, як от DBSCAN. Останній визначає кластери як області високої щільності, ігноруючи точки з низькою щільністю, що робить його стійким до шуму та викидів. На

відміну від K-Means, DBSCAN не потребує заздалегідь вказувати кількість кластерів і здатен виявляти кластери довільної форми. Шумом вважають точки, які не належать жодному кластеру через віддаленість або малу кількість сусідів [14].

Результат кластеризації на основі методу DBSCAN наведено на рис. 2.

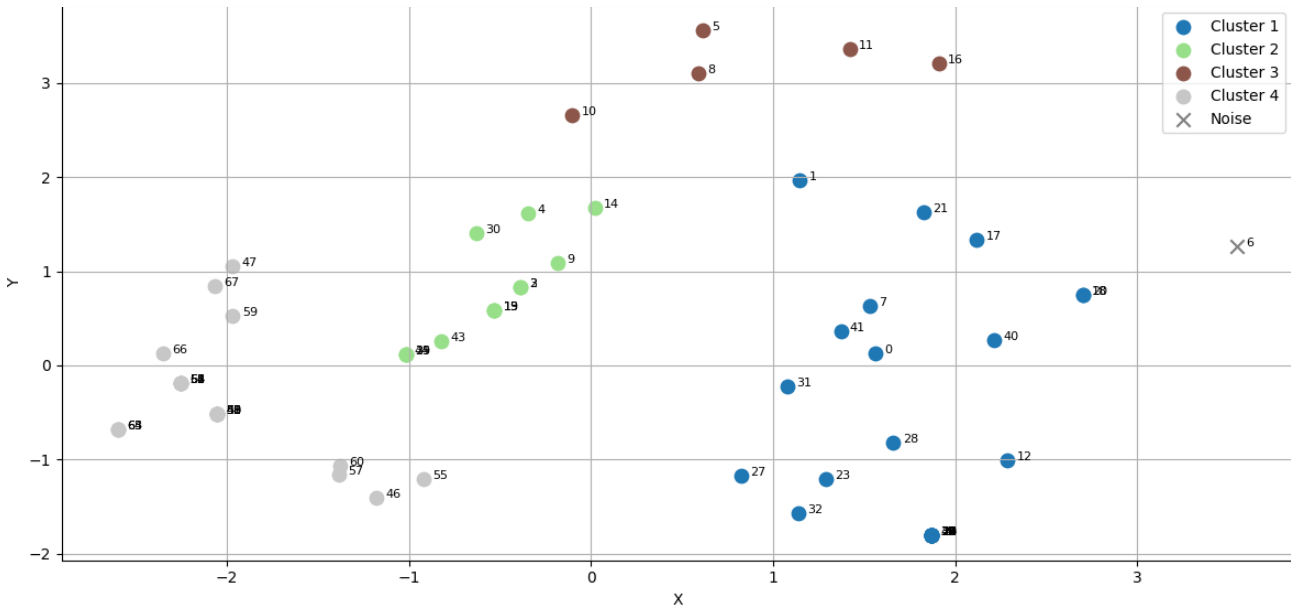


Рис. 2. Візуальний аналіз та кластеризація конструкцій сепараторів

У результаті роботи методу DBSCAN усі аналізовані конструкції класифікаторів розділено на 4 кластери і одна конструкція позначена як шум, оскільки має надто малу кількість сусідів або знаходяться далеко від щільних областей. При цьому значення максимальної відстані, на якій точка вважається сусідом іншої точки, становить $\varepsilon = 0.9$.

У перший кластер увійшло 26 конструкцій з горизонтальною та вертикальною віссю корпусу, з відцентровим або осьовим робочим колесом з живленням зверху, переважно з циркуляцією повітря усередині живлення окреме переважно без додаткового повітря, наприклад [15].

У другий кластер увійшло 13 конструкцій з горизонтальною та вертикальною віссю переважно циліндричного корпусу, з осьовими та відцентровими робочими колесами та живленням сумішшю, наприклад [9].

У третій кластер увійшло 5 конструкцій з вертикальною віссю корпусу, з відцентровим робочим колесом типу з розвантаженням тонкого уверх, а грубого – униз та із застосуванням додатковим повітрям, наприклад [17, 4].

У четвертий кластер увійшло 23 конструкції, які характеризуються тим, що мають циліндричний корпус з переважно вертикальною віссю, статичні осьові лопаті або взагалі без лопатей. Живлення відбувається в основному сумішшю повітря та матеріалу знизу або дотично збоку. Розвантаження тонких зерен переважно уверх, а грубих тільки униз, наприклад [16, 13].

Конструкція, що не увійшла до жодного кластера [16], має равликподібний корпус з вертикальною віссю, відцентрове робоче колесо, окреме завантаження

матеріалу зверху, розвантаження тонкого униз, розвантаження крупного дотично убік, без додаткового повітря.

На основі розглянутих конструкцій сформуємо дерево еволюції робочих органів повітряних відцентрових класифікаторів, яке показує не просто різні типи конструкцій, а логіку розвитку від простих до складних конструкцій, орієнтованих на енергоефективність, гнучкість подачі матеріалу і точність класифікації [16].

Розглянемо класифікатор як технічну систему – впорядковану сукупність взаємодіючих елементів із властивостями, що не зводяться до властивостей окремих частин. Його головна корисна функція – розділення сипкого матеріалу за крупністю, а для повітряного відцентрового класифікатора – розділення тонкодисперсного матеріалу за крупністю і/або масою за дією відцентрової сили, сили тяжіння та аеродинамічного опору.

Згідно з першим законом розвитку технічних систем [16], їх життєздатність визначається наявністю чотирьох основних частин: двигуна, трансмісії, робочого органу та органу управління. Щоб визначити робочий орган класифікатора, ставимо два питання: що виконує головну функцію та до чого підводиться енергія? У класифікаторі розділення здійснює потік повітря, до якого вентилятор підводить енергію. Отже, робочий орган – це саме потік повітря.

Побудуємо конкретне дерево еволюції робочого органу повітряного класифікатора – потоку повітря (рис. 3). Згідно з рекомендаціями [16] для головної лінії розвитку або стовбуру майбутнього Дерева обираємо лінію «Моно-бі-полі». Перший крок тут завжди буде моно-конструкція, тобто використання одного струменя повітря (п.1, рис. 3). На другому кроці додається ще один потік повітря, отримується бі-конструкція (п.2, рис. 3). І, нарешті, на третьому кроці додаються багато потоків повітря, отримується полі-конструкція (п.3, рис. 3).

Наступним параметром, що впливає на розподіл головних сил у відцентровому класифікаторі є спрямування вектору повітряного потоку відносно сили тяжіння, іншими словами – лінія розташування осі корпусу класифікатора. Додаємо розташування осі класифікатора – вертикальне (п.4, рис. 4) або горизонтальне (п.5, рис. 3), що фактично створить два варіанти або виміри для подальших гілок дерева.

Далі для кожного виміру проаналізуємо та визначимо варіанти робочого органу – потоку повітря, а саме форму лінії струму повітря, до якої можна застосувати лінію геометричної еволюції [16].

Перший крок цієї лінії розвитку – пряма лінія (п.6, 6', рис. 3), яка відповідає прямолінійному вектору струму повітря, у якому відсутня відцентрова сила. Як приклад можна навести конструкції [15].

Наступний крок – лінія увігнута в одному напрямі або дуга (п. 7, 7', рис. 3) – на одному повороті повітря виникає слабка відцентрова сила, яка є недостатньою та не може суттєво вплинути на рух зерен матеріалу. Можна сказати, що це конструкції з прямим струменем повітря, на шляху якого є видихляюча перешкода (п. 11, 11', рис 3). Це прямотічні класифікатори [13].

Слід зазначити, що конструкції, реалізовані на цих двох кроках не є відцентровими класифікаторами, оскільки у них повноцінно діють тільки дві сили – сила тяжіння та сила аеродинамічного опору. Ці кроки тут наведені для загального розуміння напрямку розвитку повітряних класифікаторів.

Наступний крок – лінія, вигнута у двох напрямках, що являє собою коло або спіраль (п. 8, 8', рис. 3) – це конструкції у яких потік рухається по колу і тут уже повноцінно з'являється відцентрова сила, що характерна для конструкцій відцентрових класифікаторів типу простий циклон [6].

Наступний крок – складна лінія (п. 9, 9', рис. 3) – сюди відносяться складні скручені спіральні вихорі, що виникають у динамічних відцентрових класифікаторах з робочим колесом [12, 13].

Згідно з основною тенденцією розгортання дерева еволюції, що полягає у прагненні зробити систему більш динамічною, добре керованою, адаптованою до умов роботи і навколишнього середовища [16], добудовуємо гілки у напрямку динамізації робочого органу.

Отже, розглянемо лінію динамізації у модифікації відповідно до робочого органу класифікатора.

На першому кроці потік повітря рухається без будь-яких перешкод на шляху, крупні і дрібні зерна рухаються разом у суміші, при цьому ефективність поділу невисока (п.10 ,10, рис. 3). Керування процесом розділення здійснюється тільки завдяки подачі повітря від вентилятора.

На наступному кроці, з'являється перешкода на шляху струму, що відхиляє його і забезпечує можливість зниження швидкості крупних зерен матеріалу (п.11 ,11', рис. 3). З точки зору динамізації перешкода на першому етапі нерухома (п.12 ,12', рис. 3), а наступному етапі - рухома (п.13 ,13', рис. 3), що дає змогу певним чином додатково керувати процесом розділення.

Наступним кроком є додавання статичних лопатей (п.17 ,17', рис. 3), що закручують сильніше потік повітря і збільшують вплив відцентрової сили, інтенсифікуючи розділення, особливо для тонкодисперсних матеріалів. На початку лопаті нерухомі без жодної можливості їх регулювання (п.18 ,18', рис. 3). Далі вони динамізуються і отримують можливість керування кутом нахилу цих статичних лопатей (п.19 ,19', рис 3). Це дає змогу підлаштовуватися під різні матеріали.

Наступний крок – подальша динамізація лопатей – рухомі лопаті (п.20 ,20', рис. 3), встановлені як крильчатка (робоче колесо), що обертається. Причому відразу додається підгілка варіантів виконання робочого колеса, яке може бути осьовим (п.23 ,23', рис. 3) та відцентровим (п.24 ,24', рис. 3).

І останній крок – максимальна динамізація лопатей – регульовані лопаті на робочому колесі (п.22, 22', рис. 3). Як у попередньому випадку, робочі колеса мають осьове (п.25 ,25', рис. 3) та відцентрове виконання (п.26 ,26', рис. 3).

Таким чином, отримано багатовимірне Дерево еволюції робочого органу відцентрових повітряних класифікаторів.

Системний аналіз конструкцій повітряних відцентрових класифікаторів виявив низку стійких взаємозв'язків між їх параметрами. Зокрема, конструкції з

циркуляцією повітря всередині корпусу завжди оснащені плоскими обертовими лопатями. Горизонтальні моделі мають лише відцентрові колеса або взагалі не містять робочого колеса.

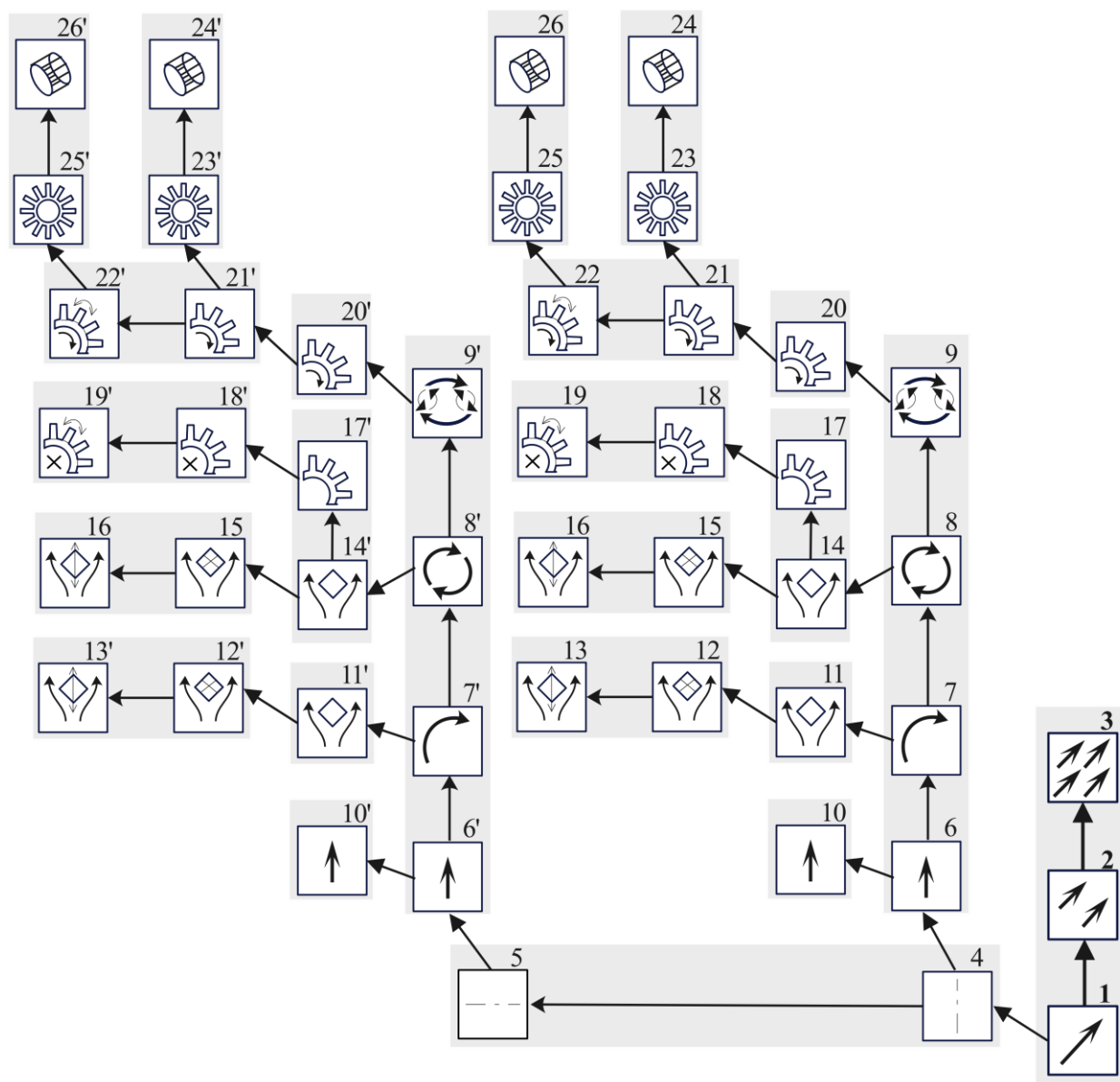


Рис. 3. Дерево еволюції робочого органу відцентрових повітряних класифікаторів

Равликова форма корпусу притаманна виключно динамічним класифікаторам з вертикальною віссю та роздільним живленням і характеризується високим рівнем специфічності конструкцій. При цьому класифікатори без робочого колеса в 97% випадків мають вертикальну вісь корпусу, а відцентрові колеса в 77% також встановлені на корпусах з вертикальною віссю. Циліндричні корпуси домінують, становлячи 84% усіх конструкцій незалежно від характеру живлення. Для конструкцій із живленням знизу в 84% випадків додаткове повітря не подається, а тонкий продукт у 75% випадків спрямовується вгору, тоді як при жив-

ленні зверху тонкий продукт у 92% випадків виводиться вбік або вниз. Завантаження матеріалу знизу у всіх розглянутих моделях здійснюється сумішшю повітря та матеріалу, натомість подача зверху переважно окрема. Найчастіше поєднуються подача основного повітряного потоку дотично збоку з розвантаженням тонких зерен угору та грубих – униз, причому ця схема супроводжується подачею додаткового повітря або застосовується у класифікаторах з равликовим корпусом. У статичних конструкціях додаткове повітря не використовується, що свідчить про спрощений функціонал. Равликова форма корпусу зустрічається лише у динамічних класифікаторах з вертикальною віссю та робочим колесом.

Серед рідкісних поєднань конструктивних параметрів виділяються кілька повторюваних варіантів. Зокрема, 4,4% конструкцій мають циліндричний корпус з вертикальною віссю та відцентровим робочим колесом, живлення матеріалу сумішшю з основним повітрям знизу, розвантаження тонких зерен угору, грубих – униз, без додаткового повітря [22]. Аналогічний відсоток конструкцій складають класифікатори з таким же корпусом і віссю, але без лопатей, з тим самим типом живлення і розвантаження [8, 13], а також варіанти з осьовим робочим колесом і схожими параметрами подачі та вивантаження [12]. Горизонтальні класифікатори без робочого колеса зустрічаються лише у 3% конструкцій [7, 13]. Равликоподібний корпус з вертикальною віссю та відцентровим колесом із живленням сумішшю матеріалу і повітря становить 2,9% досліджених моделей [2].

Аналіз конструкцій показав, що деякі комбінації параметрів не зустрічаються, що свідчить про їх гіпотетичність, технічну неможливість або нераціональність. Зокрема, класифікатори з горизонтальною віссю корпусу не мають осьового робочого колеса: усі горизонтальні моделі оснащені або відцентровим колесом, або взагалі не мають робочого колеса. Равликоподібний корпус завжди комплектується динамічними лопатями, оскільки варіанти з нерухомими лопатями або без них реалізовані лише для циліндричних корпусів. Статичні конструкції не використовують дотичне живлення, яке притаманне лише моделям з подачею зверху або знизу. Горизонтальні корпуси з додатковим повітрям не мають розвантаження тонкого продукту вниз – замість цього тонкий продукт виводиться вбік або вгору. Також равликоподібна форма корпусу без колеса або зі статичними лопатями відсутня, а конструкції з равликоподібним корпусом і горизонтальною віссю без колеса та живлення зверху не реалізовані в досліджуваних моделях.

Як було зазначено, перераховані поєднання параметрів є відсутніми в аналізованих конструкціях. Це може бути пов'язано як з технічною неможливістю реалізації, так і з раціональним вибором проектувальників (наприклад, неефективність таких схем). Однак ці поєднання можуть бути використані як потенційні напрями для наукових досліджень, оскільки їх відсутність може свідчити про невиявлені проблеми чи обмеженнями в існуючих технологіях.

У результаті проведеного аналізу існуючих відцентрових класифікаторів динамічної дії видокремлено набір параметрів, що можуть забезпечити високу ефективність поділу: равликоподібний корпус, робоче колесо з відцентровими

лопатями, відцентрову подачу повітря, окреме завантаження матеріалу, розвантаження грубого униз та відсутність додаткового потоку повітря.

Враховуючи цей набір параметрів, можна відзначити дві перспективні конструкції для подальшого вивчення: перша існуюча конструкція [7] (рис. 4, а) та інша гіпотетична, не існуюча (рис. 4, б).

Розглянемо першу виокремлену перспективну конструкцію (рис. 4, а), що має наступні параметри: корпус – равликopodobний з вертикальною віссю; робоче колесо: динамічне відцентрове; живлення: окреме, зверху; розвантаження: тонке – вгору, грубе – униз; основне повітря: дотичне збоку; додаткове повітря: відсутнє.

Перспективність такої конструкції доведена її широким застосуванням у сухому поділі з високою продуктивністю у цементній промисловості, що вимагає точності класифікації тонких фракцій. Вона демонструє ефективну роботу та здатність до точного регулювання розділення. Такий режим роботи забезпечує равликopodobний корпус з вертикальною віссю, дотичним підводом повітря та відцентровим робочим колесом, яке створює інтенсивне завихрення, що забезпечує сприятливі умови для формування відцентрових сил, які підвищують ефективність відсіву дрібних частинок та зменшує вплив гравітації на осадження зерен. Окреме живлення зверху сприяє рівномірному розподілу матеріалу в робочій зоні та дозволяє точніше контролювати концентрацію матеріалу. Відцентрові лопаті створюють стабільне аеродинамічне поле з мінімальними турбулентними зонами, що зменшує затори грубої фракції та забезпечує стабільність класифікації.

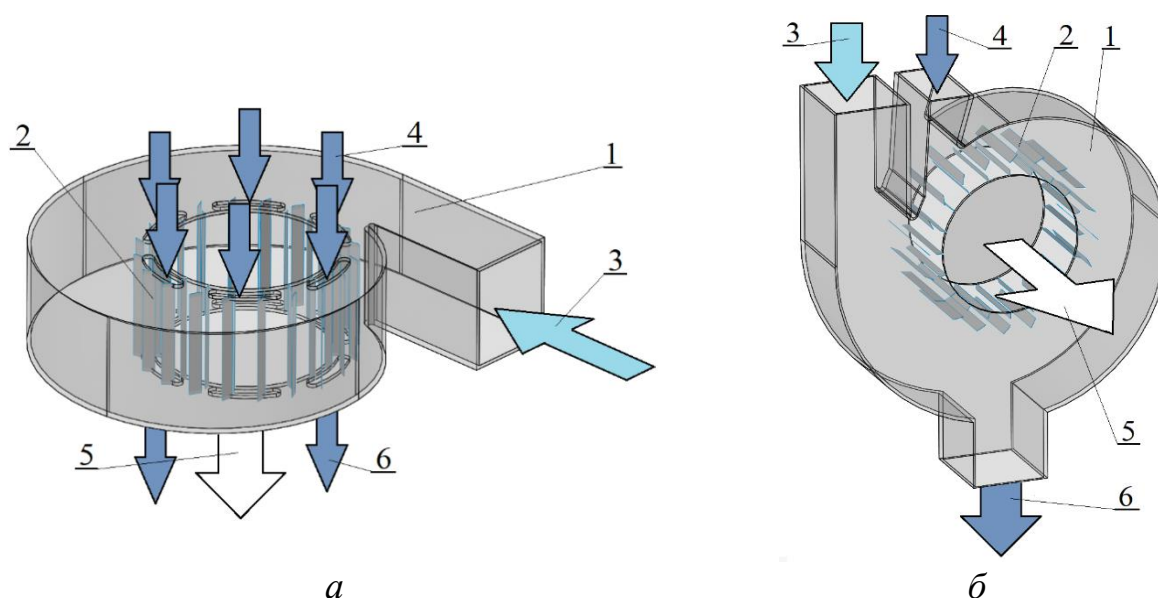


Рис. 4. Перспективні конструкції класифікатора: а – з вертикальною віссю; б – з горизонтальною віссю, 1 – равликopodobний корпус; 2 – робоче колесо відцентрового типу; 3 – потік основного повітря; 4 – завантаження вихідного матеріалу; 5 – розвантаження тонких зерен; 6 – розвантаження крупних зерен

Друга перспективна конструкція (див. рис. 4, б), аналога якої не існує, має наступні параметри: корпус – равликopodobний з горизонтальною віссю; робоче колесо: динамічне відцентрове; живлення: окреме, зверху; розвантаження: тонке – убік, грубе – униз; основне повітря: дотично зверху; додаткове повітря: відсутнє.

Конструкція має унікальну комбінацію параметрів, оскільки равликopodobний корпус з горизонтальною віссю потенційно підвищує ККД за рахунок більш плавного розподілу потоків. В дотичне підведення повітря і матеріалу зверху створює ефект "вітрового шару", що покращує сепарацію та забезпечує оптимальні умови для швидкого входу матеріалу в робочу зону, що, у свою чергу, зменшує механічне зношування. Розвантаження тонкої фракції убік зменшує ризик рециркуляції. Як вже було зазначено, відсутність додаткового повітря спрощує конструкцію та знижує енерговитрати.

Можна сказати, що обидві конструкції заслуговують на поглиблене дослідження через їхню унікальність, потенціал для оптимізації та можливість застосування в різних галузях промисловості.

Висновки. Виявлено кореляції між напрямками живлення, розвантаження, формою корпусу та типом робочого колеса, що дозволяє автоматизувати класифікацію нових конструкцій. Перевага класифікаторів з вертикальною віссю зумовлена поєднанням відцентрової сили, сили тяжіння та простоти конструкції. Найпоширеніші моделі мають циліндричний корпус, робоче колесо та окреме живлення знизу або зверху. Додатковий потік повітря застосовується рідко, що свідчить про достатність основного. Унікальні конструкції відображають спеціалізовані підходи та можуть бути ефективними за певних умов. Виділено дві перспективні конструкції для подальшого CFD-моделювання з метою оцінки аеродинаміки та впливу напрямку основного потоку на якість сепарації.

Перелік посилань

1. Abohelwa, M., Benker, B., Javadi, M., Wollmann, A., & Weber, A. P. (2023). Limitation in the Performance of Fine Powder Separation in a Turbo Air Classifier. *Processes*, 11(10), 2817. <https://doi.org/10.3390/pr11102817>
2. Abohelwa, M., Wollmann, A., Benker, B., Plack, A., Javadi, M., & Weber, A. P. (2024). Size Classification and Material Sorting of Fine Powders with a Deflector Wheel Air Classifier and an Electrostatic Separator. *Powders*, 3(4), 550–573. <https://doi.org/10.3390/powders3040029>
3. Adamčíka M., Svěráka T. & Peciar P. (2017). Parameters Affecting Forced Vortex Formation in Blade Passageway of a Dynamic Air Classifier. *Acta Polytechnica*, 57(5):304, 304–315. <https://doi.org/10.14311/AP.2017.57.0304>
4. Barimani M., Green S. & Rogak S. (2018). Particulate concentration distribution in centrifugal air classifiers. *Minerals Engineering*, 126, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.007>
5. Betz, M., Nirschl, H., & Gleiss, M. (2022). Development of Prediction Models for Pressure Loss and Classification Efficiency in Classifiers. *Processes*, 10(4), 627. <https://doi.org/10.3390/pr10040627>
6. Chu K.W., Wang B., Xu D.L., Chen Y.X., Yu A.B. Chu K., Wang B., Xu D., Chen Y. & Yu A. (2011). CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*, 66, 834–847. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.11.026>
7. Esmailpoura M., Mohebbia A. & Ghalandarib V.. (2023). CFD simulation and optimization of an industrial cement gas-solid air classifier. *Particuology*, 89(2). <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.10.011>

8. Eswaraiah C., Narayanan S.S. & Jayanti S. (2008). A reduced efficiency approach-based process model for a circulating air classifier. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47, 1887–1900. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.10.016>
9. Guizani R., Mhiri H. & Bournot P. (2014). CFD study of the effect of rotation speed on dynamic air separator flow characteristics and pressure drop. *Conference: 2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC), March*. <https://doi.org/10.1109/IREC.2014.6826939>
10. Gyro rotor Air Classifier System. Technical specification. (n.d.) Metso Corporation <https://www.metso.com/globalassets/saleshub/documents---episerver/gyro-rotor-air-classifier-system-technical-data-sheet-en.pdf?r=3>
11. Ho, N. X., Dinh, H. T., Dau, N. T., & Nguyen, B. H. (2024). A Numerical Study on the Flow Field and Classification Performance of an Industrial-Scale Micron Air Classifier under Various Outlet Mass Airflow Rates. *Processes*, 12(9), 2035. <https://doi.org/10.3390/pr12092035>
12. Ho, N. X., Dinh, H. T., & Dau, N. T. (2025). Numerical Study to Optimize the Operating Parameters of a Real-Sized Industrial-Scale Micron Air Classifier Used for Manufacturing Fine Quartz Powder and a Comparison with the Prototype Model. *Processes*, 13(1), 106. <https://doi.org/10.3390/pr13010106>
13. Klumpar I.V., Currier F.N. & Ring T.A. (1986). Air classifiers. *Chemical engineering*, March 3, 77–92.
14. Salman F., & Fauziah. (2023). Comparison Analysis of K-Means and DBSCAN Algorithms for Improving Budget Absorption Efficiency in EIS. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 3(2), 378–383. <https://doi.org/10.47709/brilliance.v3i2.3373>
15. Shapiro M. & Galperin V. (2004). Air classification of solid particles. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification* 44(2), 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.02.022>
16. Shpakovsky N. (2016). Tree of Technology Evolution. CreateSpace Independent Publishing Platform.
17. Sun Z., Sun G., Liu J., & Yang X. (2017). CFD simulation and optimization of the flow field in horizontal turbo air classifiers. *Advanced Powder Technology*, 28(6). <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.03.016>
18. Sun Z., Liang L., Liu C., Zhu Y., Zhang L., & Yang G. (2021). CFD simulation and performance optimization of a new horizontal turbo air classifier. *Advanced Powder Technology*, 32, 977–986. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.01.041>
19. Wani A.A. (2025). Comprehensive review of dimensionality reduction algorithms: challenges, limitations, and innovative solutions. *PeerJ Computer Science* 11:e3025 <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.3025>.
20. Wang Z., Yang H., Sun Z., Yao Y., & Yang G. (2023). Structure optimization of rotor cage blades for turbo air classifier based on entropy production analysis. *Advanced Powder Technology*, 34(8), 104103. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.104103>
21. Zeng, Y., Zhang, S., Zhou, Y., & Li, M. (2020). Numerical Simulation of a Flow Field in a Turbo Air Classifier and Optimization of the Process Parameters. *Processes*, 8(2), 237. <https://doi.org/10.3390/pr8020237>
22. Zeng, Y., Huang, B., Qin, D., Zhou, S., & Li, M. (2022). Numerical and Experiment Investigation on Novel Guide Vane Structures of Turbo Air Classifier. *Processes*, 10(5), 844. <https://doi.org/10.3390/pr10050844>

ABSTRACT

Purpose. To conduct a systematic analysis and generalization of the structural features of dynamic centrifugal air classifiers in order to identify typical and rare parameters, interrelations, and patterns of their geometric and functional evolution, with the aim of developing recommendations for the design, modernization, and selection of equipment for the classification of fine and ultrafine materials.

The methods. Sixty-eight designs described by ten parameters were studied. Principal Component Analysis (PCA) was applied for dimensionality reduction and visualization, and DBSCAN clustering

was used to identify groups. An evolution tree of the working element – the air flow – was constructed.

Findings. A systematic analysis and generalization of the structural features of dynamic centrifugal air classifiers were carried out. It was determined that the most common designs have: a vertical axis (92.6%), a cylindrical housing (86.8%), and dynamic blades (66%). Typical combinations account for $\leq 16\%$ of models, indicating significant diversity. Two principal components explain 71.04% of the variance. DBSCAN identified 4 groups and one atypical design. Correlations were found: air circulation is always accompanied by flat rotating blades; horizontal models only have centrifugal wheels or none; static designs have no additional air supply. Two promising designs were identified – an existing one (snail-shaped housing, vertical axis) and a hypothetical one (snail-shaped housing, horizontal axis). The evolutionary tree illustrates the development of the working unit of centrifugal air separators.

The originality. For the first time, a comprehensive multidimensional analysis of classifiers was performed using PCA and DBSCAN, systematizing designs and patterns of their evolution, and proposing a development tree of the working element.

Practical implementation. Optimization of designs can improve efficiency, reduce energy consumption and wear, integrate recommendations into CAD/CAM systems, and serve as a basis for CFD modeling.

Keywords: *mineral beneficiation, air centrifugal classifiers, parameters of centrifugal classifiers, frequency distribution of parameters, dimensionality reduction, clustering, systematic analysis, evolution tree, air flow.*

дата першого надходження статті до видання	02.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	05.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	07.09.2025