

УДК 621.928.37:631.8

СТЕПАНЮК А. Р.*, КОРНІСНКО Я. М., ДМИТРУК А. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЗДІЛЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

При виробництві гранульованих органо-мінеральних добрив із застосуванням техніки псевдозрідження шляхом зневоднення рідких гетерогенних сумішей як енергоефективної технології, виникає необхідність очистки відпрацьованого теплоносія що містить тверді частинки, пил та значну кількість водяної пари. Тверді частинки розміром до 20 мкм ефективно вловлюються в циклонних апаратах. Для подальшого вловлювання водяної пари та дрібнодисперсних твердих частинок використовується скруббер із додатковим контуром циркуляції води, яка, після досягнення концентрації понад 20 %, відводиться на стадію грануляції. Це призводить до підвищення енерговитрат на виробництво в цілому. Проведення попередньої конденсації водяної пари з викидів, що містять 5-7 % (мас.) води, дозволить зменшити витрати на доочистку викидів та підвищити рівень екологічної безпеки на виробництві.

Для вибору найбільш ефективного способу розділення багатокомпонентних газових дисперсій, що супроводжується зміною їх агрегатного стану, доцільно провести аналіз та систематизацію існуючих наукових розробок. Подібний підхід дозволяє обрати оптимальне рішення для розділення газо-пилового та газо-рідинного потоків в умовах існування великої кількості видів апаратурного оформлення та рівня інноваційності останніх. Крім раціональної конструкції апаратів в проведених дослідженнях велика увага приділялася також питанням енергоефективності, ресурсоощадності та забезпечення стану екологічної безпеки на виробництвах.

За результатами проведеного аналізу запропоновано використання схеми з послідовно встановлених циклонів ЦН-11 та СК-ЦН-33. Циклон ЦН-11 пропонується використовувати для попереднього вловлювання високодисперсного пилу, а СК-ЦН-33 для конденсації та вловлювання водяної пари та не вловлених у попередньому циклоні твердих частинок.

Ключові слова: *циклон, багатокомпонентні суміші, водяна пара, дрібнодисперсні частинки, псевдорозрідження, енергоефективність, ресурсоощадність, екологічна безпека*

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2024.312418

* Corresponding author: arstepaniuk@gmail.com

Received 14 February 2024; Accepted 05 September 2024

Постановка проблеми. В сучасних умовах створення інноваційного обладнання для хімічної технології передбачає беззаперечне виконання умов екологічної безпеки. В першу чергу це стосується промислових виробництв, які в технологічному циклі використовують процеси сушіння дисперсних матеріалів в апаратах із псевдозрідженим шаром. Застосування такого обладнання для процесів зневоднення та грануляції при одержанні органо-мінеральних добрив забезпечує термічний коефіцієнт використання теплоти більше 50%. Проте в цьому випадку разом з відпрацьованим теплоносієм на стадію очистки надходить значна кількість водяної пари та твердих частинок розміром 2-30 мкм. Отже, виникає необхідність вилучення з газових викидів парової і твердої фази та повернення їх до технологічного циклу. Такий підхід дозволить вирішити задачу щодо зниження техногенного тиску у вигляді газових викидів, ліквідувати промислові стоки та підвищити ресурсоощадність технології в цілому.

Метою статті є аналіз методів та апаратурного оформлення процесів вловлювання високодисперсних частинок та водяної пари та напрями моделювання роботи цих апаратів.

Виклад основного матеріалу. Існує значна кількість видів апаратурного оформлення для розділення газо-пилового та газо-рідинного потоків. Найбільш поширеними є сухі та мокрі пиловловлювальні апарати.

До сухих апаратів можна віднести: механічні апарати (осаджувальні, інерційні та відцентрові) та фільтруючі апарати (волоконні, тканинні та зернисті). До мокрих апаратів можна віднести промивачі (форсуночні, скрубєрні та динамічні) та рідинно-плівкові (динамічні, відцентрові та ударно-інерційні).

Найбільш поширеним способом розділення неоднорідних газових систем є проведення процесів в полі відцентрових сил [1-25]. Для врахування особливостей дисперсної фази в роботі [10] запропоновано класифікацію геометричних модифікацій циклонів, яка ділиться на чотири категорії: зміна конфігурації вихідного патрубку, впускного патрубку, корпусу циклону та пилезбірника. Конструкції апаратів для сухої та мокрої очистки визначаються конкретними умовами, проте напрямок досліджень спрямований на підвищення ефективності розділення при мінімізації енергозатрат на реалізацію процесу.

Зокрема в роботі [1] для збільшення швидкості на вході в циклон запропоновано встановлення труби Вентурі з воронкоподібним введенням газу, сприяє збільшенню відцентрової сили і енерговитрат та виконано багатоцільову оптимізацію для знаходження оптимальних геометричних конфігурацій циклону, які підвищують продуктивність циклону.

Значний вплив на процес розділення в циклонах має розподіл частинок на вході циклон з високою концентрацією твердих частинок та внутрішній характер руху [18]. Потоки газу в циклоні вводились до циклону через штуцери прямокутної форми з різними площами для визначення ступеня розподілу частинок із застосуванням числового симуляційного експерименту. Результати досліджень показали, що зменшення площі вхідного патрубку може суттєво зменшити розсіювання частинок всередині циклону та підвищити ефективність осадження.

Авторами в роботі [19] досліджувалось використання циклонних апаратів для класифікації дрібнодисперсних порошків (рис. 1). Вплив технологічних параметрів та геометричних розмірів при встановленні на вході в циклон труби Вентурі на розподіл швидкостей і ефективність класифікації дрібнодисперсних порошків у циклонних апаратах було досліджено за допомогою чисельного моделювання та підтверджено експериментально. Результати показали, що швидкість на вході та діаметр корпусу апарата мають значний вплив на розподіл швидкостей та розділення частинок завдяки змінам в інтенсивності вихору та осьовому зворотному потоку. Довжина корпусу апарата впливає на ефективність, і слід вибрати достатню довжину для послаблення дії впливу від вихорів вхідного повітря та покращення розділення частинок.

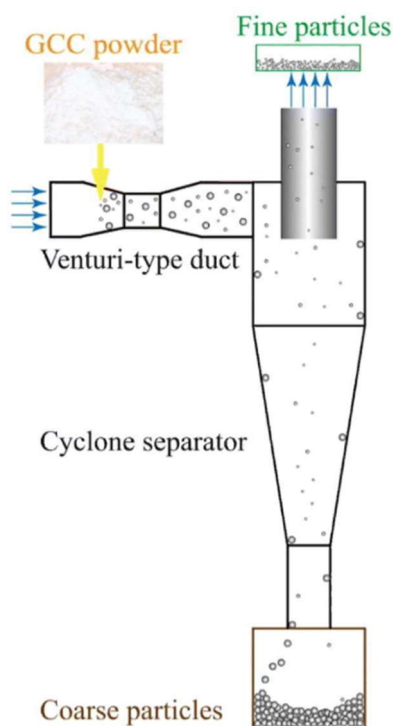


Рис. 1 – Результати дослідження [19]

Варіації із способами введення запиленого газу до циклону наведено в роботах [5] та в яких досліджували вплив нового методу введення чистого повітря в циклон через щілину, які розміщена на кришці апарату, біля вихідного патрубку (рис. 2), та дві конструкції циклонів, які містили два та чотири вхідні патрубки [23] (рис. 3).

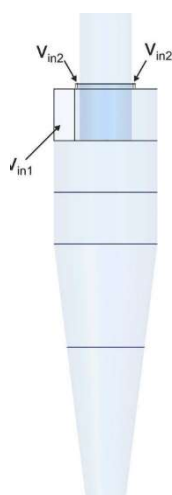


Рис. 2 – Модернізований циклон [5]

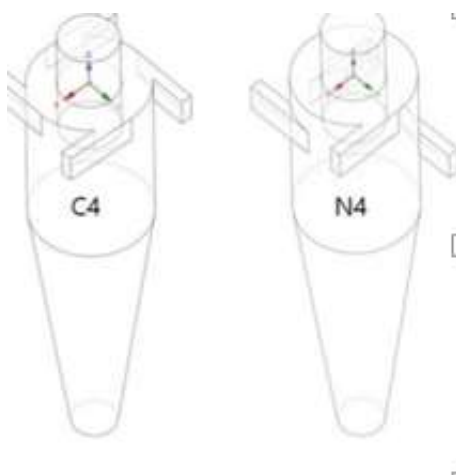


Рис. 3 – Модернізований циклон [23]

Проведено симуляційні експерименти, які показали покращення ефективності їх роботи на 1 % вища, ніж у одноканальному підведенні циклону, а мінімальні розмір вловлених частинок становить 1,399 мкм.

Автори досліджень пропонують різноманітні конструкції корпусів апаратів, наприклад вдосконалення циклонних сепараторів шляхом оптимізації їхніх геометричних параметрів та використання чисельного моделювання для досягнення більшої продуктивності і ефективності сепарації

Автори [2] порівнюють слотовий відвід із звичайним відводом в циклонному сепараторі та аналізують їхні впливи на характеристики потоку та сепарації. Вони також показують покращення ефективності сепарації твердих частинок.

Автори [3] зосередилися на оптимізації продуктивності циклонів зі спіральними перегородками змінної довжини та ребристим конусом різних продуктивностей. Вони використовували чисельні моделі та методи штучного інтелекту для оптимізації параметрів сепаратора та досягнення кращої ефективності вловлювання твердих частинок, зокрема дрібнодисперсних частинок.

Автори [4] аналізували вплив високих температур на продуктивність циклонів та запропонували нові конструкції циклонів, які були оптимізовані для роботи в екстремальних умовах. В роботі також використовували чисельну симуляцію для аналізу та порівняння продуктивності різних конструкцій циклонів.

Автори [10] досліджували роботу циклону для вилучення твердих частинок з газової системи в промисловості. Автори досліджують геометричні модифікації циклонів та їх вплив на продуктивність, враховуючи економічні аспекти.

Автори [13] досліджували роботу циклонів для видалення твердих частинок із високотемпературного газу. Дослідження включало чисельний аналіз і оптимізацію параметрів для підвищення продуктивності.

У роботі [17] досліджується ефективність циклонних апаратів з випуклими конічними ділянками. Для цього крива профілю замінює пряму стінку конуса, використовуючи два нерухомих кінця першої – отриманий модель циклону схожа на форму горщика. Розглядаються п'ять різних конфігурацій циклонів з радіусом вигину, що дорівнює 1,5, 1,25, 1,0, 0,75 та 0,5 м. Виконано числову симуляцію оцінки полів потоку, ефективність збору та втрати тиску за допомогою високорозвиненої моделі LES (великі вихори замикання).

Авторами [21] наведено чисельне моделювання руху потоку газу і порошку в типовому циклоні Larple, особливістю якого є те, що вхідний штуцер розміщено по спіралі (рис. 4). Виконаний стимуляційний експеримент підтверджено фізичними експериментами.

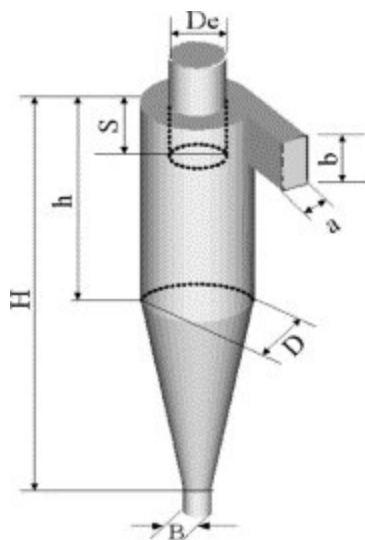


Рис. 4 – Циклон Larple

У статті [24], на основі методу зв'язку обчислювальної гідродинаміки та методу дискретних елементів (CFD-DEM), проводяться симуляційні експерименти щодо розділення ультралегких частинок циклонним апаратом при різних швидкостях входу. Досліджувався розподіл тиску та швидкості фази відсіювання в циклоні.

У роботі [16] демонструється вплив швидкості входу та температури газу на перепад тиску і та розміру частинок на ефективність вловлювання при різних умовах роботи двухстадійного циклонного блоку, який складається з двох циклонів розташованих послідовно. Причому в першому варіанті циклони були однакового діаметра, а в другому перший циклон у мав діаметр у три рази більший за другий. Це дало змогу вилучити на першій стадії частинки більшого діаметра, а на другій з більшою ефективністю вилучити частинка меншого діаметру через зниження загальної концентрації твердих частинок у газовому потоці. Симуляційні моделі наведені на рис. 5.

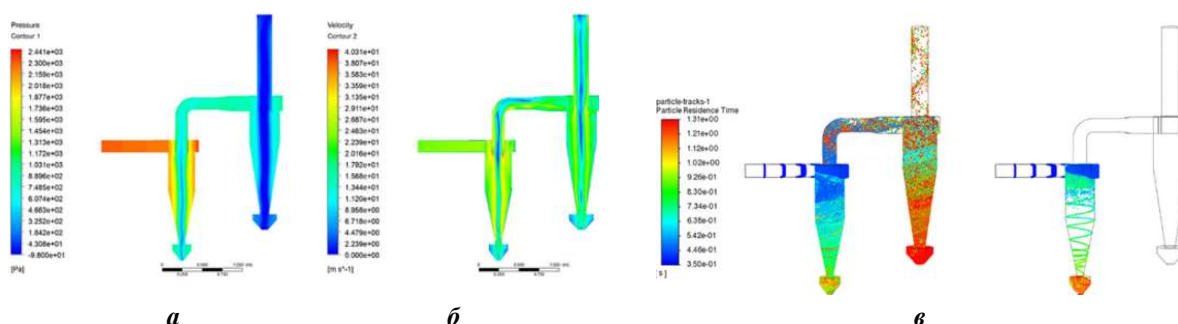


Рис. 5 – Симуляційні моделі роботи циклона: а) епюри тиску; б) епюри швидкостей; в) ступінь вловлювання частинок менше 5 мкм

Автори [20] аналізували рух потоків у циклоні типу Stairmand за допомогою моделі LES (рис. 6). Згідно з математичним аналізом, кінетична енергія та швидкість дисипації нестиислої рідини безпосередньо прив'язана до абсолютного значення швидкості руху рідини. Вихрова структура має сильно завихрена і розпадається на безліч дрібних вихорів.

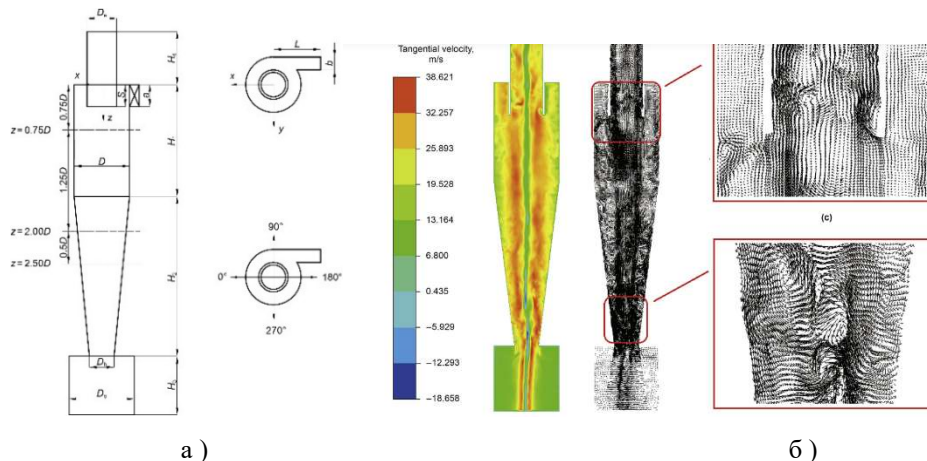
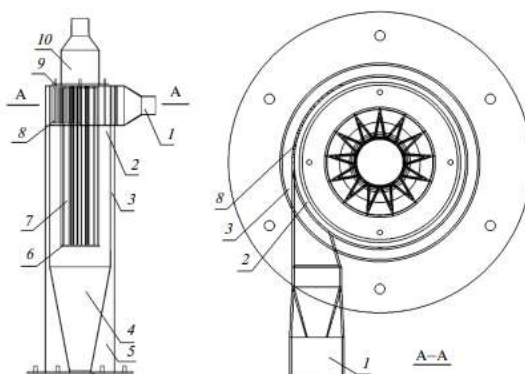


Рис. 6 – Циклон Stairmand: а) геометричні форми, б) епюри швидкостей по висоті циклона

Автори [25] розглядали запропоновану нову конструкцію циклона, яка містить жалюзійну трубу для відводу очищених газів. Автори експериментально встановили залежність ефективності вловлювання від продуктивності апарату (рис. 7). Такий спосіб придатний для очистки сухих газів з частинками з низькою адгезією.



1 — вхідний патрубок; 2 — внутрішній циліндричний корпус; 3 — зовнішній циліндричний корпус; 4 — внутрішній бункер; 5 — зовнішній бункер; 6 — фільтр-патрон; 7 — система регенерації фільтрпатрона; 8 — цільові вікна; 9 — опорна шайба; 10 — вихідний патрубок

Рис. 7 – Схема циклону

Автори [7] розглядали циклон з виведенням очищених газів вниз, використовуючи чисельні симуляційні експерименти для оптимізації його геометрії. Розробники стверджують, що досягли високої ефективності розділення для дрібних частинок.

Автори [11] використовують чисельне моделювання для дослідження вловлювання частинок у циклоні з аксіальним вихрозбірником. Дослідники аналізують вплив геометричних параметрів на продуктивність. Автори вважають, що вдалося забезпечити оптимізацію параметрів для підвищення продуктивності шляхом використання чисельних симуляційних експериментів.

Автори [15] пропонують зміну геометрії конусоподібного днища циліндро-конічного циклону, зокрема розмірів кришки, з метою підвищення продуктивності. Проте відомо що в цьому випадку при збільшенні

продуктивності суттєво зменшиться ефективність вловлювання. Автори досліджень пропонують різноманітні конструкції пристроїв для виведення продуктів вловлювання, наприклад вдосконалення циклонних апаратів шляхом зміни їхніх геометричних параметрів та використання чисельного моделювання для досягнення кращої продуктивності і ефективності сепарації.

Автори [22] вивчали вплив наявності внутрішніх конусів різних діаметрів та висот, розташованих внизу циклона, на продуктивність циклону. Було виконано чисельні симуляційні експерименти. Проте досвід експлуатації циклонів свідчить про недоцільність встановлення таких пристроїв особливо в циклонах, які працюють в сушильних установках.

У статті [25] навели порівняльні дослідження впливу зменшення поперечного перерізу вихідного каналу заторопиймача разом із витягнутим циліндричним корпусом на характер руху і продуктивність звичайного циклона. Автори досліджень пропонують різноманітні конструкції пристроїв для розділення твердих або рідких викидів, ви виконують їх аналіз шляхом використання чисельного моделювання для досягнення кращої продуктивності і ефективності сепарації.

Автори [6] розробили новий каскадний газорідкий циклон, який дозволяє розділити тверду або краплеподібну фракції та газ, для очищення природного газу. Для аналізу роботи апарату розробники використали чисельне моделювання.

Автори [12] пропонують двоступінчастий циклонний апарат для газу і рідини з широким спектром застосувань у промисловості.

Дослідники [14] розглядали вплив місцевого зношування стінок циклону на його продуктивність, використовуючи гідродинамічні обчислення та модель Ока для аналізу та передбачення ерозії в циклоні,

За результатами аналізу пропонується використовувати послідовно встановлені циклони ЦН-11 та СК-ЦН-33. Циклон ЦН-11 пропонується використовувати для попереднього вловлювання високодисперсного пилу, а СК-ЦН-33 для конденсації та вловлювання водяної пари та не вловлених у попередньому циклоні твердих частинок. Схема їх розміщення зображена на рисунку 8.

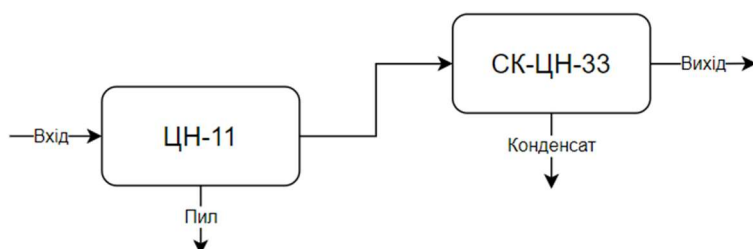


Рис. 8 – Схема циклонів

Підібрано фізичну модель для процесу очищення твердих частинок та водяної пари (рис. 9).

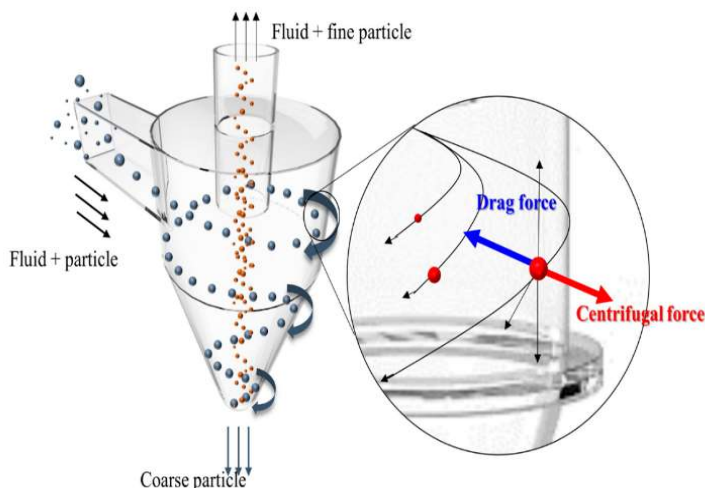


Рис. 9 – Фізична модель

послідовно. Спочатку встановлюється циклон ЦН-11 для вловлення твердих частинок, а далі – циклон СК-ЦН-33 для конденсації та вловлювання водяної пари, та вловлювання конденсату з одночасним вловлюванням не вловлених у попередньому циклоні твердих частинок.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому планується моделювання процесу конденсації водяної пари та комплексного вловлення конденсованої водяної пари з дрібнодисперсним пилом. Основою цих досліджень стане симуляційний експеримент по розділенню багатокомпонентних газових викидів з утилізацією теплоти газів, що викидаються в атмосферу, та проведення роботи гранулятора із псевдозрідженим шаром в замкнутому циклі, що сприятиме як зменшенню викидів в атмосферу, так і обсягів використання води.

Список використаної літератури

1. Ming Guo, Dang Khoi Le, Xun Sun, Joon Yong Yoon. Multi-objective optimization of a novel vortex finder for performance improvement of cyclone separator. *Powder Technology*. Vol. 410. 09/2023. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117856>
2. Ming Guo, Hao Xue, Jian Pang, Dang Khoi Le, Xun Suir Joon Yong Yoon. Numerical investigation on the swirling vortical characteristics of a Stairmand cyclone separator with slotted vortex finder. *Powder Technology*. Volume 416, 15 February 2023, 118236. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118236>
3. Ehsan Dehdarnejad, Morteza Bayareh. Performance analysis of a novel cyclone separator using RBFNN and MOPSO algorithms. *Powder Technology*. Volume 426, 1 August 2023, 118663. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118663>
4. Lakhbir Singh Brar, Marek Wasilewski. Investigating the effects of temperature on the performance of novel cyclone separators using large-eddy simulation. Volume 416, 15 February 2023, 118213. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118213>
5. Marek Wasilewski, Lakhbir Singh Brar. Performance analysis of the cyclone separator with a novel clean air inlet installed on the roof surface. *Powder Technology*. Volume 428, 1 October 2023, 118849. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118849>
6. Teng Li, Zhiqian Sun, Kun Geng, Mingze Sun, Zhenbo Wang. Numerical analysis of a novel cascading gas liquid cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. Volume 270, 15 April 2023, 118518. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118518>
7. Leilei Zhang, Yanxin Chen, Bo Zhao, Minhui Dang, Yanfei Yao. Numerical simulation on structure optimization of escape-pipe of cyclone separator with downward outlet. *Powder Technology*. Volume 411, October 2022, 117588. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117588>
8. Mohammed A. Elhashimi, Michelle Gee, Bahman Abbasi. Unconventional desalination: The use of cyclone separators in HDH desalination to achieve zero liquid discharge. *Desalination*. Volume 539, 1 October 2022, 115932. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115932>
9. R. Vivek, S. Venkatesh, V. Manoj, Manoj Kumar, Mohanasundaram. A brief review on improving materials particulates using cyclone separator by geometrical and turbulence factors. *Materials Today: Proceedings*. Volume 69, Part 3, 2022, Pages 1076-1079. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.170>
10. Ming Guo, Liu Yang, Hyungjoon Son, Dang Khoi Le, Sivakumar Manickam, Xun Sun, Joon Yong Yoon. An overview of novel geometrical modifications and optimizations of gas-particle cyclone separators. *Separation and Purification Technology*. Volume 329, 15 January 2024, 125136. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125136>
11. B Gopalakrishnan, G Saravana Kumar, K Arul Prakash. Parametric analysis and optimization of gas-particle flow through axial cyclone separator: A numerical study. *Advanced Powder Technology*. Volume 34, Issue 2, February 2023, 103959. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.103959>
12. Qiang-qiang Wang, Jia-qing Chen, Chun-sheng Wang, Yi-peng Ji, Chao Shang, Ming Zhang, Yi Shi, Guo-dong Ding. Design and performance study of a two-stage inline gas-liquid cyclone separator with large range of inlet gas volume fraction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Volume 220, Part B, January 2023, 111218. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111218>

13. Hossein Fatahian, Esmaeel Fatahian, Rasool Erfani. Square Cyclone Separator: Performance Analysis Optimization and Operating Condition Variations CFD-DPM and Taguchi Method. *Powder Technology*. Volume 428, 1 October 2023, 118789. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118789>.
14. Lehui Zhang, Junling Fan, Pan Zhang, Fei Gao, Guanghui Chen, Jianlong Li. Effect of local erosion on the flow field and separation performance of the cyclone separator. *Powder Technology*. Volume 413, January 2023, 118007. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118007>
15. Wansong Li, Zhiqiang Huang, Gang Li. Improvement of the cyclone separator performance by the wedge-shaped roof: A multi-objective optimization study”, *Chemical Engineering Science*. Volume 268, 15 March 2023, 118404. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118404>
16. Rajdeep Sardar, Jinho Oh, Mirae Kim, Jung-Eon Lee, Seungho Kim, Kyung Chun Kim. The effect of inlet velocity, gas temperature and particle size on the performance of double cyclone separator. *Chemical Engineering and Processing Process Intensification*. Volume 191, September 2023, 109469. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109469>
17. Satyanand Pandey, Lakhbir Singh Brar. Performance analysis of cyclone separators with bulged conical segment using large-eddy simulation. *Powder Technology*. Volume 425, 1 July 2023, 118584. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118584>
18. Yuge Yao, Manxia Shang, Xiwei Ke, Zhong Huang, Tuo Zhou, Junfu Lyu. Effects of the inlet particle spatial distribution on the performance of a gas-solid cyclone separator. *Particuology*. Volume 85, February 2024, Pages 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.03.024>
19. Xuliang Yang, Jintao Yang, Songbo Wang, Yuemin Zhao. Effects of operational and geometrical parameters on velocity distribution and micron mineral powders classification in cyclone separators. *Powder Technology*. Volume 407, July 2022, 117609. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117609>
20. Zhu-Wei Gao, Zhong-Xin Liu, Yao-Dong Wei, Cheng-Xin Li, Shi-Hao Wang, Xin-Yu Qi, Wei Huang. Numerical analysis on the influence of vortex motion in a reverse Stairmand cyclone separator by using LES model. *Petroleum Science*. Volume 19, Issue 2, April 2022, Pages 848-860. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.11.009>
21. B. Wang, D.L. Xu, K.W. Chu, A.B. Yu. Numerical study of gas-solid flow in a cyclone separator. *Applied Mathematical Modelling*. Volume 30, Issue 11, November 2006, Pages 1326-1342. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.011>
22. Farzad Parvaz, Seyyed Hossein Hosseini, Khairy Elsayed, Goodarz Ahmadi. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators. *Separation and Purification Technology*. Volume 201, 7 August 2018, Pages 223-237. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.001>
23. Dang Khoi Le, Joon Yong Yoon. Numerical investigation on the performance and flow pattern of two novel innovative designs of four-inlet cyclone separator. *Chemical Engineering and Processing Process Intensification*. Volume 150, April 2020, 107867. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107867>
24. Haili Zhou, Zhanqi Ni, Qinglong Zhang, Qiang Wang, Xuan Lv. Numerical study on gas-solid flow characteristics of ultra-light particles in a cyclone separator. *Powder Technology*. Volume 344, 15 February 2019, Pages 784-796. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.054>
25. E. Balestrin, R.K. Decker, D. Noriler, J.C.S.C. Bastos, H.F. Meier. An alternative for the collection of small particles in cyclones: Experimental analysis and CFD modeling. *Separation and Purification Technology*. Volume 184, 31 August 2017, Pages 54-65. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.023>

Andrii Stepaniuk, Yaroslav Kornienko, Andrii Dmytruk

SEPARATION OF MULTICOMPONENT GAS MIXTURES

In the production of granular organo-mineral fertilizers using the fluidization technique by dehydrating heterogeneous liquids, as an energy-efficient technology, there is a need to purify the spent coolant containing solid particles, dust and a significant amount of water vapor. Solid particles up to 20 microns in size are effectively captured in cyclone devices. To further capture water vapor and fine solid particles, a scrubber is used with an additional circulation circuit involving an additional amount of water, which, upon reaching a concentration of more than 20%, is discharged back to the granulation stage. This leads to an increase in energy consumption for production in general.

Condensation of vapors in a dispersion containing 5-7% (w/w) moisture in the form of water vapor at the second stage of purification will increase the level of environmental safety in production. To select an innovative method of separation of multicomponent gas dispersions accompanied by a change in the aggregate state and a rational design of the apparatus, a review of scientific articles and developments such as systematization of existing methods was carried out.

Such an approach makes it possible to choose the optimal solution for the separation of gas-dust and gas-liquid flows in the conditions of the existence of a large number of types of equipment design and the level of their innovation. In addition to the rational design of the devices, great attention was also paid to the issues of energy efficiency, resource saving and ensuring the state of environmental safety at production facilities in the conducted research.

Based on the results of the analysis, it is proposed to use a scheme of consecutively installed cyclones CN-11 and SK-CN-33. It is proposed to use the ЦН-11 cyclone for the preliminary capture of highly dispersed dust, and the SK-CN-33 for condensation and capture of water vapor and solids not caught in the previous cyclone particles.

Keywords: cyclone, multicomponent mixtures, water vapor, fine particles, fluidization, energy efficiency, resource saving, environmental safety

References

1. Ming Guo, Dang Khoi Le, Xun Sun, Joon Yong Yoon. (2023), "Multi-objective optimization of a novel vortex finder for performance improvement of cyclone separator", *Powder Technology*, Vol. 410. 09/2023. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117856>
2. Ming Guo, Hao Xue, Jian Pang, Dang Khoi Le, Xun Sun, Joon Yong Yoon. (2023), "Numerical investigation on the swirling vortical characteristics of a Stairmand cyclone separator with slotted vortex finder", *Powder Technology*, Volume 416, 15 February 2023, 118236. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118236>
3. Ehsan Dehdarnejad, Morteza Bayareh. (2023), "Performance analysis of a novel cyclone separator using RBFNN and MOPSO algorithms", *Powder Technology*, Volume 426, 1 August 2023, 118663. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118663>
4. Lakhbir Singh Brar, Marek Wasilewski. (2023), "Investigating the effects of temperature on the performance of novel cyclone separators using large-eddy simulation", *Powder Technology*, Volume 416, 15 February 2023, 118213. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118213>
5. Marek Wasilewski, Lakhbir Singh Brar. (2023), "Performance analysis of the cyclone separator with a novel clean air inlet installed on the roof surface", *Powder Technology*, Volume 428, 1 October 2023, 118849. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118849>
6. Teng Li, Zhiqian Sun, Kun Geng, Mingze Sun, Zhenbo Wang. (2023), "Numerical analysis of a novel cascading gas-liquid cyclone separator", *Chemical Engineering Science*, Volume 270, 15 April 2023, 118518. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118518>
7. Leilei Zhang, Yanxin Chen, Bo Zhao, Minhui Dang, Yanfei Yao. (2022), "Numerical simulation on structure optimization of escape-pipe of cyclone separator with downward outlet", *Powder Technology*, Volume 411, October 2022, 117588. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117588>
8. Mohammed A. Elhashimi, Michelle Gee, Bahman Abbasi. (2022), "Unconventional desalination: The use of cyclone separators in HDH desalination to achieve zero liquid discharge", *Desalination*, Volume 539, 1 October 2022, 115932. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115932>
9. R. Vivek, S. Venkatesh, V. Manoj, Manoj Kumar, Mohanasundaram. (2022), "A brief review on improving materials particulates using cyclone separator by geometrical and turbulence factors", *Materials Today: Proceedings*, Volume 69, Part 3, Pages 1076-1079. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.170>
10. Ming Guo, Liu Yang, Hyungjoon Son, Dang Khoi Le, Sivakumar Manickam, Xun Sun, Joon Yong Yoon. (2024), "An overview of novel geometrical modifications and optimizations of gas-particle cyclone separators", *Separation and Purification Technology*, Volume 329, 15 January 2024, 125136. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125136>
11. B Gopalakrishnan, G Saravana Kumar, K Arul Prakash. (2023), "Parametric analysis and optimization of gas-particle flow through axial cyclone separator: A numerical study", *Advanced Powder Technology*, Volume 34, Issue 2, February 2023, 103959. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.103959>

12. Qiang-qiang Wang, Jia-qing Chen, Chun-sheng Wang, Yi-peng Ji, Chao Shang, Ming Zhang, Yi Shi, (2023), “Guo-dong Ding. Design and performance study of a two-stage inline gas-liquid cyclone separator with large range of inlet gas volume fraction”, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 220, Part B, January 2023, 111218. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111218>
13. Hossein Fatahian, Esmaeel Fatahian, Rasool Erfani. (2023), “Square Cyclone Separator: Performance Analysis Optimization and Operating Condition Variations Using CFD-DPM and Taguchi Method”, *Powder Technology*, Volume 428, 1 October 2023, 118789. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118789>.
14. Lehui Zhang, Junling Fan, Pan Zhang, Fei Gao, Guanghui Chen, Jianlong Li. (2023), “Effect of local erosion on the flow field and separation performance of the cyclone separator”, *Powder Technology*, Volume 413, January 2023, 118007. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118007>
15. Wansong Li, Zhiqiang Huang, Gang Li. (2023), “Improvement of the cyclone separator performance by the wedge-shaped roof: A multi-objective optimization study”, *Chemical Engineering Science*/ Volume 268, 15 March 2023, 118404. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118404>
16. Rajdeep Sardar, Jinho Oh, Mirae Kim, Jung-Eon Lee, Seungho Kim, Kyung Chun Kim. (2023), “The effect of inlet velocity, gas temperature and particle size on the performance of double cyclone separator”, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Volume 191, September 2023, 109469. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109469>
17. Satyanand Pandey, Lakhbir Singh Brar. “Performance analysis of cyclone separators with bulged conical segment using large-eddy simulation”, *Powder Technology*, Volume 425, 1 July 2023, 118584. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118584>
18. Yuge Yao, Manxia Shang, Xiwei Ke, Zhong Huang, Tuo Zhou, Junfu Lyu. (2024), “Effects of the inlet particle spatial distribution on the performance of a gas-solid cyclone separator”, *Particuology*, Volume 85, Pages 133-145. February 2024, Pages 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.03.024>
19. Xuliang Yang, Jintao Yang, Songbo Wang, Yuemin Zhao. (2022), “Effects of operational and geometrical parameters on velocity distribution and micron mineral powders classification in cyclone separators”, *Powder Technology*, Volume 407, July 2022, 117609. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117609>
20. Zhu-Wei Gao, Zhong-Xin Liu, Yao-Dong Wei, Cheng-Xin Li, Shi-Hao Wang, Xin-Yu Qi, Wei Huang. (2022), “Numerical analysis on the influence of vortex motion in a reverse Stairmand cyclone separator by using LES model”. *Petroleum Science*, Volume 19, Issue 2, pp. 848-860. April 2022, <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.11.009>
21. B. Wang, D.L. Xu, K.W. Chu, A.B. Yu. (2006), “Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator“, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 30, Issue 11, Pages 1326-1342. November 2006, Pages 1326-1342. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.011>
22. Farzad Parvaz, Seyyed Hossein Hosseini, Khairy Elsayed, Goodarz Ahmadi. (2018), “Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators”, *Separation and Purification Technology*, Volume 201, pp. 223-237. 7 August 2018, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.03.001>
23. Dang Khoi Le, Joon Yong Yoon. (2020), “Numerical investigation on the performance and flow pattern of two novel innovative designs of four-inlet cyclone separator”, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Volume 150, April 2020, 107867. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107867>
24. Haili Zhou, Zhanqi Hu, Qinglong Zhang, Qiang Wang, Xuan Lv. (2019), “Numerical study on gas-solid flow characteristics of ultra-light particles in a cyclone separator”, *Powder Technology*, Volume 344, pp. 784-796. 15 February 2019, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.054>
25. E. Balestrin, R.K. Decker, D. Noriler, J.C.S.C. Bastos, H.F. Meier. (2017), “An alternative for the collection of small particles in cyclones: Experimental analysis and CFD modeling”, *Separation and Purification Technology*, Volume 184, Pages 54-65. 31 August 2017, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.023>