

2. Ковзна суміш із помірними концентраціями (1–10%), у якій тверді частинки та газові бульбашки мають власні швидкості. Вводиться число Стокса, що характеризує інерційність включень, та описуються додаткові втрати від міжфазного зсуву швидкостей.

3. Густі або аеровані середовища, де кожна фаза описується окремими рівняннями збереження маси й імпульсу. Враховуються сили опору, підймальна сила, сила додаткової маси та турбулентна дифузія. Такий підхід відповідає повноцінним CFD-моделям і дозволяє описувати стратифікацію фаз та реальну структуру потоку.

Отримана модель забезпечує комплексний опис механізмів формування напору у вільновихрових насосах, дозволяючи кількісно оцінювати вплив геометрії робочого колеса, параметрів вільної камери, концентрації включень та співвідношення лопаткового й вихрового потоків. Це створює підґрунтя для точнішого прогнозування напірних характеристик, оптимізації конструкції та розроблення енергоефективних насосів для роботи в умовах підвищеної абразивності й нерівномірності потоку.

Список використаних джерел

1. Kondus V., Ciszak O., Zhukov A., Mushtai M., Polkovnychenko V., Krugliak A. (2024). Development of a self-cleaning mechanism for torque-flow pumps. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 11(2), pp. F17–F26. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(2\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(2).f3)
2. Pavlenko, I., Kondus, V., & Puzik, R. (2025). Hydrodynamics of Toroidal Vortices in Torque-Flow Pumps. *Applied Sciences*, 15(20), 11299. <https://doi.org/10.3390/app152011299>

СЕКЦІЯ 1 ТЕХНІЧНА ГІДРОГАЗОМЕХАНІКА ГОЛОВА СЕКЦІЇ – РОГОВИЙ А.С., Д-Р ТЕХН. НАУК, ПРОФЕСОР

Єсипчук С.С.

<https://orcid.org/0000-0002-4101-8827>,

Скиданенко М.С., канд. техн. наук, доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-0277-1867>,

Ляпощенко О.О., д-р техн. наук, професор,

<https://orcid.org/0000-0002-6657-7051>

FD-МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗДІЛЕННЯ ДВОХФАЗНИХ СУМІШЕЙ У ВИХРОВІЙ КАМЕРІ СЕПАРАТОРА

Ефективне розділення багатофазних потоків є актуальним завданням у нафтогазовій та хімічній промисловостях. Використання вихрових сепараторів є перспективним завдяки їх високій продуктивності та ефективності. На основі аналізу існуючих конструкцій сепараторів розроблено базову модель вихрової камери з тангенціальним підводом рідини. Створено серію геометричних модифікацій, що включають конструкції з подвійним конусом, циліндричними вставками та різними кутами при вершині конічних поверхонь. CFD-моделювання використовували моделі турбулентності $k-\epsilon$ та $k-\epsilon$ RNG, для аналізу дисперсної фази використано метод DPM (Discrete Phase Model).

Проведено факторні експерименти у діапазоні швидкостей 1–10 м/с з використанням води як модельного середовища. Проаналізовано отримані гідродинамічні характеристики, поля швидкостей, тиску та траєкторії руху частинок.

Отримані результати корелюються з даними інших дослідників. Згідно з *Hamdy et al.* [1], збільшення довжини конуса призводить до різкого зростання втрат тиску, що підтверджується дослідженнями в лабораторії СумДУ – моделі з кутом при вершині конуса понад 100° демонструють зростання коефіцієнта опору до 3.35. Дослідження *Wang et al.* [2] засвідчили, що використання додаткових вставок зменшує перепад тиску на 7.8%, тоді як конструкція з подвійним конусом винахідників з СумДУ забезпечує зниження опору на 35%.

Робота Qi [3] довела ефективність внутрішніх модулів, що підтверджується результатами для моделі з циліндричною вставкою. Дослідження *Huang et al.* [4] та *Frank et al.* [5] вказують на важливість комплексного підходу до проектування сепараторів, що узгоджується з запропонованою методикою поєднання CFD-моделювання з аналізом різних геометричних конфігурацій. Робота *Wasilewski et al.* [6] доводить вплив кута вхідного патрубку на ефективність сепарації, що підтверджує необхідність оптимізації геометричних параметрів. Дослідження *Suvanjumrat et al.* [7] демонструють важливість CFD-моделювання для аналізу сепарації мікрочастинок, що узгоджується з отриманими результатами по розподілу частинок за розмірами авторами з СумДУ.

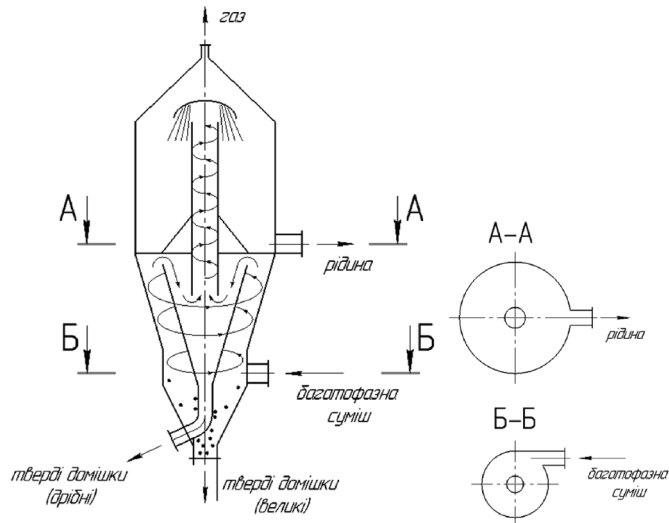


Рисунок 1 – Принципова схема роботи сепаратора

Конструкція з подвійним конусом виявилася найбільш ефективною, демонструючи коефіцієнт гідравлічного опору 1.85, що є на 35% нижчим за показники інших розрахованих моделей. Таке зниження гідравлічного опору дозволяє значно зменшити витрати енергії на прокачування середовища крізь сепаратор. Зменшення гідравлічних втрат досягається за рахунок раціонального розподілу тиску та швидкості в робочому об'ємі, що дозволяє використовувати менш потужні насосні агрегати та знижує експлуатаційні витрати.

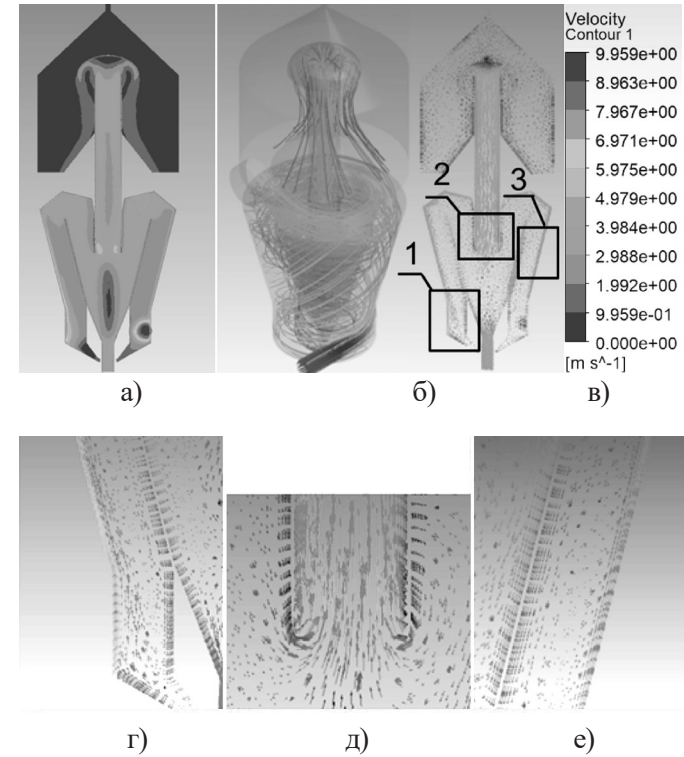


Рисунок 2 – Візуалізація потоку рідини

На рисунку 2 показано комбінацію трьох методів візуалізації потоку в сепараторі: ізолінії швидкості (а), лінії течії (б) та вектори (в, г, д, е). Виділено характерну двовихрову структуру – висхідний осьовий потік і низхідний пристінний. Максимальні швидкості близько 10 м/с спостерігаються біля вхідного патрубка.

Лінії течії демонструють спіральний рух рідини: вниз вздовж стінок і вгору по осі. Векторний аналіз виявляє зони високих швидкостей біля стінок конуса та рециркуляційні ділянки. Така структура забезпечує ефективне розділення фаз: важкі частинки відводяться до стінки і нижнього виходу, а легкі фракції захоплюються центральним потоком до верхнього виходу.

Дослідження розподілу твердих виявило чітку залежність ефективності сепарації від швидкості потоку. Результати узгоджуються з дослідженням *Wei et al.* [8], які виявили залежність траєкторій частинок від їх діаметра. При швидкості 3 м/с спостерігалось значне перекриття фракцій з робочим зрізом 120–130 мкм.

Підвищення швидкості до 6 м/с зсувало зріз до 100–120 мкм, а при 10 м/с досягався оптимальний режим із різким зрізом при 20–40 мкм. Частинки діаметром понад 150 мкм ефективно видалялися через нижній вихід, тоді як фракції менше 80 мкм переважно виносилися з верхнім продуктом.

Траєкторії руху частинок демонстрували чітке розшарування за розміром, що підтверджує результати *Dueck et al.* [9] щодо теоретичної кривої розподілу гідроциклону. Спостерігалось виразне розділення частинок за величиною: крупні частинки 300–500 мкм швидко виносилися до стінки та осідали через нижній вихід, утворюючи щільні спіральні траєкторії. Фракції 150–300 мкм демонстрували проміжну поведінку, водночас частинки 50–150 мкм переважно утримувалися в приосьовому потоці. При швидкості 9 м/с формувався максимальний радіальний градієнт тиску 50–60 кПа, що забезпечувало стабільне розділення фракцій.

Оптимізована геометрія вихрової камери з подвійним конусом дозволяє досягти високої енергоефективності та селективності розділення. Отримані результати демонструють потенціал геометричної оптимізації для покращення характеристик промислових сепараторів та можуть бути використані при проєктуванні обладнання для нафтогазової та хімічної промисловостей.

Список використаних джерел

1. Hamdy, O.; Bassily, M. A.; El-Batsh, H. M.; Khalil, A. E.; El-Nagar, A. A. Numerical study of the effect of changing the cyclone cone length on the gas–flow field. *Appl. Math. Model.* 2017, 46, 81–97.
2. Wang, M.; Feng, D.; Wang, J.; Hou, L.; Miao, E. CFD Investigation on the Performance of Cyclone Separators with Divergent or Convergent Insertion Pipes. *Processes* 2023, 11 (7), 2061.
3. Qi, B.B. Numerical Simulation and Experimental Study of Axial Flow Gas–Liquid Separator; Ph.D. Dissertation, China University of Petroleum (East China), Qingdao, 2018.

4, Huang, K. T.; Chen, J. Y.; Chen, Y.; Zhang, L.; Li, L.; Liu, M.; Wang, X.; Zhao, Q.; Zhou, H.; Yan, H.; et al. Research status of vapor–liquid separation technology. *CIESC J.* 2021, 72, 30–41.

5. Frank, M.; Kamenicky, R.; Drikakis, D.; Thomas, L.; Ledin, H.; Wood, T. Multiphase flow effects in a horizontal oil and gas separator. *Energies* 2019, 12, 2116.

6. Wasilewski, M.; Brar, L. S. Effect of the inlet–duct angle on the performance of cyclone separators. *Sep. Purif. Technol.* 2019, 213, 19–33.

7. Suvanjumrat, C.; Phirommark, P.; Chaiyanupong, J.; Priyadumkol, J.; Phengpom, T.; Chookaew, W.; Tekasakul, P.; Inthavong, K.; Promtong, M. CFD analysis of microscopic particle separation in low–volumetric classifiers: DPM tracking and experimental validation for enhanced efficiency using geometric modification strategy. *Chem. Eng. J.* 2024, 502, 157997.

8. Wei, N.; Qiao, Y.; Liu, A.; Zhao, J.; Zhang, L.; Xue, J. Structure optimization and applicability of hydrocyclone in natural–gas–hydrate exploitation. *Front. Earth Sci.* 2022, 10, 991208.

9. Dueck J., Farghaly M., Neesse T. The Theoretical Partition Curve of the Hydrocyclone. *Minerals Engineering* 2013, 45–46, 1–8.