



Прийнято 23.06.2025. Прорецензовано 06.10.2025. Опубліковано 26.12.2025.

УДК 621.644.6:532.5:004.94

DOI: 10.31471/1993-9868-2025-2(44)-160-169

ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ МУЛЬТИЦИКЛОННОГО ПИЛОУЛОВЛЮВАЧА В УМОВАХ КОМПРЕСОРНИХ ТА ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СТАНЦІЙ НА ОСНОВІ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ

Дорошенко Ю. І. *

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-7196-9383>e-mail: yuliia.doroshenko@nung.edu.ua**Люта Н. В.**

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-3321-0982>e-mail: natalia.liuta@nung.edu.ua

Анотація. У статті представлено результати чисельного моделювання процесу очищення природного газу в мультициклонному пилоуловлювачі типу ГП-604, який використовується на компресорних станціях магістральних газопроводів для видалення твердих механічних домішок перед подачею газу у турбокомпресорні агрегати. З огляду на складну структуру внутрішніх потоків і взаємодію газової та твердої фаз, дослідження виконано із застосуванням методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) у програмному середовищі ANSYS Fluent R18.1. Турбулентність описано за допомогою моделі $k-\epsilon$, що дозволяє врахувати змішування потоків та утворення вихрових структур, а рух дисперсної фази відтворено через дискретну фазову модель (DPM), що дало змогу визначити траєкторії частинок у потоці та оцінити ефективність їх осадження в різних зонах апарата. Встановлено закономірності формування обертових потоків, рециркуляційних зон і впливу цих структур на гідродинаміку всередині мультициклону, що має важливе значення для підвищення ефективності очищення. Розраховано залежність ефективності осадження від розміру частинок: для діаметра 12–23 мкм вона сягає 95–99 %, тоді як для частинок менш ніж 5 мкм – близько 87–90 %. Крім того, проведено аналіз впливу швидкості газового потоку, геометричних параметрів циклону та розподілу вхідного потоку на ефективність роботи апарата, що дозволяє більш точно прогнозувати його поведінку у різних режимах. Результати моделювання продемонстрували, що ефективність очищення значною мірою залежить від рівномірності розподілу потоку між окремими циклонами, а також від точності параметрів, використаних у чисельній моделі. Узгодження отриманих даних з експлуатаційними характеристиками апарата підтверджує адекватність застосованих CFD-моделей і їхню придатність для оптимізації конструкцій пилоуловлювачів у газотранспортних системах. Зроблено висновок про доцільність використання CFD як потужного інструменту інженерного аналізу при проектуванні, модернізації та технічному обслуговуванні обладнання для очищення природного газу. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення впливу температурних і тискових режимів роботи апарата, аналізу поведінки частинок різної природи та щільності, а також на оптимізацію геометричних параметрів мультициклону для досягнення максимальної ефективності видалення

Запропоноване посилання: Дорошенко, Ю. І. & Люта, Н. В. (2025). Оптимізація роботи мультициклонного пилоуловлювача в умовах компресорних та газорозподільних станцій на основі CFD-моделювання. Нафтогазова енергетика, 2(44), 160-169. doi: 10.31471/1993-9868-2025-2(44)-160-169.

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

найдрібніших домішок. Крім того, результати можуть слугувати основою для розробки нових конструктивних рішень пилоуловлювачів і рекомендацій щодо експлуатації компресорних станцій у реальних умовах промислового газопостачання.

Ключові слова: мультициклон; пилоуловлювач; обчислювальна гідродинаміка; CFD; природний газ; компресорна станція; DPM-модель; моделювання; сепарація; ANSYS Fluent.

Вступ

Очищення газу в умовах компресорних станцій магістральних газопроводів та газорозподільних станцій (ГРС) є важливим етапом у забезпеченні ефективної, безпечної та довготривалої експлуатації газотранспортної системи. Процес транспортування природного газу передбачає його переміщення на великі відстані під високим тиском через складну систему трубопроводів, де важливу роль відіграють компресорні станції. У свою чергу, ГРС є завершальною ланкою цієї системи, де газ підготовлюється до подачі кінцевому споживачеві.

Природний газ, що транспортується магістральними трубопроводами, часто містить різноманітні домішки — механічні (пил, пісок, окалина), рідкі (вода, конденсат, залишки масил), а також агресивні хімічні сполуки, як от сірководень або вуглекислий газ. Ці забруднення становлять серйозну загрозу для обладнання компресорних станцій, оскільки можуть спричинити абразивне зношування, корозійні процеси, а також засмічення трубопроводів і арматури. Якщо не забезпечити достатній рівень очищення газу, термін служби дороговартісного обладнання суттєво скорочується, а витрати на його обслуговування зростають.

Крім того, забруднення газу негативно впливають на його фізико-хімічні властивості, що знижує ефективність роботи компресорних агрегатів. Збільшення густини чи наявність вологи в потоці ускладнює процес підвищення тиску, призводить до зростання витрат енергії та зменшення продуктивності станцій. Тому очищення газу безпосередньо пов'язане з підвищенням енергоефективності всієї системи транспортування газу.

Ще одним вагомим аргументом на користь очищення є забезпечення безпеки. Газ із підвищеним вмістом вологи або конденсату може стати причиною гідроударів, обмерзання арматури або навіть вибухонебезпечних ситуацій, особливо в умовах високого тиску. Утворення конденсату на стінках труб також сприяє розвитку внутрішньої корозії, яка поступово знижує міцність трубопроводів і підвищує ризик аварій.

У контексті нормативних вимог очищення газу також має першочергове значення. Державні стандарти (ДСТУ, ГОСТ, а також міжнародні вимоги, наприклад, EN) чітко регламентують допустимі концентрації механічних і хімічних домішок. Недотримання цих норм не лише загрожує безпеці транспортування, а й може стати причиною юридичних та фінансових санкцій з боку регуляторів або партнерів, особливо в разі експорту газу.

На завершальному етапі транспортування (в умовах ГРС) газ повинен відповідати критеріям якості, адже саме тут він переходить до системи розподілу та подається безпосередньо споживачам: від промислових підприємств до населення. У цьому випадку вкрай важливо, щоб газ не містив компонентів, здатних пошкодити побутове або промислове обладнання, а також мав стабільну теплоту згоряння.

Для забезпечення високого рівня очищення на компресорних станціях та ГРС використовують різноманітне технологічне обладнання: фільтри-сепаратори, циклонні апарати, газохолоджувачі, абсорбери та адсорбери. Кожен із цих елементів виконує свою функцію в загальній схемі очищення: від грубого механічного відокремлення домішок до глибокого видалення вологи й хімічно активних компонентів.

Таким чином, очищення газу є невід'ємною частиною процесу його транспортування і розподілу. Процес очищення газу забезпечити стабільність роботи обладнання, продовжити термін його експлуатації, дотримуватись вимог стандартів і, що найголовніше, гарантувати безпеку для персоналу, споживачів і довкілля.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Найбільшого поширення на компресорних та газорозподільних станціях (КС та ГРС) магістральних газопроводів набули мультициклонні пилоуловлювачі завдяки поєднанню ефективності, надійності, простоти конструкції та економічності. Їх застосування обумовлене специфікою умов експлуатації на КС, де газ транспортується під високим тиском і часто містить значну кількість механічних домішок.

Насамперед, мультициклонні апарати ефективно видаляють тверді частинки середнього та великого розміру, такі як пил, пісок, окалина, іржа. Завдяки відцентровому принципу дії, циклонні апарати створюють обертовий рух газового потоку, під дією якого тверді частинки відокремлюються від газу та осідають у приймальну камеру.

Мультициклонна конструкція — це система з кількох паралельно працюючих циклонів малого діаметра. Такий підхід дає можливість досягти високої продуктивності при компактних розмірах, що особливо важливо на великих КС з інтенсивним потоком газу. До того ж, наявність кількох робочих елементів забезпечує стійкість до збоїв: вихід з ладу одного з циклонів не зупиняє роботу всього агрегату.

Ще однією важливою перевагою є низький гідравлічний опір порівняно з іншими типами пилоуловлювачів. Це мінімізує втрати тиску в системі, що позитивно впливає на енергоефективність роботи компресорної станції. Також мультициклонні пилоуловлювачі не мають рухомих частин, тому вони відзначаються високою надійністю, довговічністю та простотою в експлуатації і обслуговуванні.

Окрім цього, вони не потребують складного автоматизованого управління чи системи регенерації, як, наприклад, адсорбери або фільтри тонкого очищення. Це робить їх економічно доцільними, особливо для попереднього очищення газу на першому етапі перед компресією.

Отже, мультициклонні пилоуловлювачі стали найбільш поширеними на КС завдяки комплексному поєднанню технічних переваг, таких як висока ефективність у вилученні механічних домішок, надійність, невисокі експлуатаційні витрати та здатність працювати в умовах високого тиску і великих обсягів газу. Проте, як і будь-яке технологічне обладнання, вони мають свої особливості та певні проблеми в експлуатації, які необхідно враховувати для забезпечення надійної роботи систем очищення газу.

Такою особливістю роботи мультициклонів є їх залежність від режимів потоку газу. Вони працюють за принципом створення відцентрових сил, які відокремлюють тверді частинки від газового потоку. Тому при зниженні тиску або зменшенні витрати газу відцентрові сили слабшають, і ефективність очищення падає. Така нестабільність може спостерігатися на газорозподільних станціях, де потоки газу часто змінюються залежно від добових та се-

зонних навантажень. Ще одна проблема полягає в тому, що для досягнення максимальної ефективності роботи мультициклонного блоку необхідно забезпечити рівномірний розподіл газового потоку між окремими циклонами. Нерівномірне навантаження може призвести до того, що деякі циклони будуть перевантажені, а інші працюватимуть недостатньо ефективно, що знижує загальну продуктивність системи.

Особливості роботи мультициклонних пилоуловлювачів, зокрема їх залежність від режимів потоку газу та необхідність рівномірного розподілу газу між окремими циклонами, безпосередньо обумовлюють важливість використання тривимірного (3D) моделювання при їх проектуванні і оптимізації.

Проблемою підвищення ефективності використання мультициклонних пилоуловлювачів в умовах КС та ГРС шляхом застосування тривимірного моделювання займалися як українські дослідники Серебрянський Д. О., Плашихін С. В., Безносик Ю. О., Новодворський В., Степанюк А., Кичак Р., Кузнєцов С. І., Михайлик В. Д., Русанов С. А. так і іноземні вчені Xue X., Sun G., Wan G., Shi M. Zhen Wei Zhang, Yong Song, Wei Wei Cao.

Автори [1] моделювали очищення газових потоків у циклонах, проведено чисельне дослідження ефективності роботи циклонного пилоуловлювача зі зміненою геометрією. Метою роботи було вдосконалення конструкції циклона для покращення процесу осадження твердих частинок із газового потоку та зменшення гідравлічних втрат. У рамках дослідження було використано методи комп'ютерного моделювання (CFD), зокрема програмний комплекс ANSYS Fluent. Для моделювання турбулентного руху газу обрано стандартну двопараметричну модель турбулентності $k-\epsilon$, а рух твердих частинок описано за допомогою дискретної лагранжевої моделі (DPM). Автори порівнювали гідродинамічні характеристики та ефективність сепарації між базовою конструкцією циклона і запропонованим варіантом з поліпшеними формами вхідного сопла, корпусу та вихідного конуса. Результати моделювання показали, що удосконалена конструкція забезпечує рівномірніший розподіл швидкостей у внутрішньому об'ємі циклона та зменшує інтенсивність турбулентності у центральній частині потоку. Це сприяє кращому осадженню частинок середніх і великих розмірів у стіновій зоні та зменшує повторне підхоплення пилу у вихідний потік.

Порівняльний аналіз показав, що ефективність очищення газу в новій конструкції зросла

на 5–10 % у порівнянні зі стандартною, а гідравлічні втрати зменшилися на 8–12 %, що дозволяє знизити витрати енергії на транспортування газу. Це робить запропоновану конструкцію доцільною для використання на підприємствах, де важливими є як якість очищення, так і енергоефективність. У підсумку, автори дійшли висновку, що впровадження конструктивних змін на основі CFD-моделювання дозволяє не лише підвищити продуктивність циклону, а й забезпечити стабільнішу роботу при змінних параметрах потоку. Стаття містить конкретні рекомендації щодо геометричних параметрів, які можна застосовувати в промислових умовах.

Автори статті [2] представили результати чисельного дослідження гідродинамічних процесів, що відбуваються в циклонах із модернізованою конструкцією. Метою дослідження було покращення ефективності очищення газопилових потоків за рахунок зміни геометричних параметрів циклона, зокрема – форми та розмірів вхідного патрубку, конфігурації корпусу та вихідного конуса. В основі роботи лежить використання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD), що дозволяє просторово змодельовати поведінку як газової фази, так і твердих частинок у потоці. Моделювання здійснювалось у програмному середовищі ANSYS Fluent із застосуванням турбулентної моделі $k-\epsilon$ для опису поведінки газової фази та лагранжевої моделі дискретної фази для твердих частинок. Завдяки такому підходу вдалося отримати детальну картину внутрішніх потоків у сепараторі як у поперечному, так і в поздовжньому перерізах. На основі отриманих результатів автори дійшли висновку, що оновлена конструкція циклона забезпечує більш стабільну і структуровану течію, зменшуючи інтенсивність вторинних вихорів у центральній зоні та покращуючи умови для осадження пилових частинок у периферійній частині. Це сприяє підвищенню ефективності процесу сепарації: чисельно зафіксовано зростання ступеня очищення повітря на 5–10 % у порівнянні зі стандартними моделями циклону, при цьому перепад тиску через апарат зменшився на 8–12 %. Таким чином, удосконалена конструкція не лише підвищує якість очищення, а й дозволяє знизити енергоспоживання установки. У роботі також звертається увага на практичну доцільність впровадження таких конструктивних змін в умовах реального виробництва. Результати моделювання можуть бути використані для проектування нових циклонних установок або для модернізації існуючих з метою

досягнення вищої продуктивності та енергоефективності. Автори наголошують, що застосування CFD-методів дозволяє не лише передбачити ефективність роботи циклона ще на етапі проектування, але й виявити потенційні зони втрат та неефективної роботи, які важко виявити експериментально.

У роботах [3,4] зведені результати експериментальних та стендових випробувань циклофільтрів.

У роботі [5] представлено результати тривимірного чисельного моделювання поведінки газопилової суміші в спіральному циклонному сепараторі. Метою дослідження було отримання детального уявлення про внутрішню структуру потоку та механізми відокремлення твердих частинок у складній геометричній конфігурації циклона. Для цього було використано обчислювальну гідродинаміку (CFD), а саме, програмні засоби, що базуються на розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса у поєднанні з моделлю турбулентності $k-\epsilon$. У ході дослідження автори змодельовали тривимірний розподіл швидкості, тиску та концентрації частинок у сепараторі. Було встановлено, що в робочому об'ємі циклона формується складна система вторинних вихрових структур, зокрема центральний зворотний вихор і периферійні оберткові потоки. Ці структури безпосередньо впливають на траєкторії руху пилових частинок, обумовлюючи механізм інерційного осадження: частинки з більшою масою швидше переміщуються до стінок під дією відцентрової сили та осаджуються в нижній частині циклона. Також автори відзначили, що в зоні виведення очищеного газу утворюється область зниженого тиску, яка може спричиняти повторне захоплення частинок у повітряний потік, що негативно впливає на ефективність очищення. У зв'язку з цим підкреслюється важливість правильної конструкції вхідного патрубка та конусної частини сепаратора. Отримані результати чисельного моделювання було порівняно з доступними експериментальними даними, і встановлено добру відповідність, що підтверджує адекватність використаної моделі. Таким чином, автори зробили висновок, що методи CFD дозволяють не лише глибоко дослідити поведінку газопилового потоку в циклонах, але й виступають як ефективний інструмент для оптимізації геометрії таких пристроїв з метою підвищення їх енергоефективності та ефективності очищення.

Автори [6] застосували ANSYS FLUENT з ARSM і методами PSIC/SPTM для аналізу розподілу концентрації частинок у газовому цик-

лоні. представлено результати чисельного моделювання розподілу концентрації частинок у газовому циклонному сепараторі. Метою дослідження було вивчення впливу різних параметрів конструкції та режимів роботи циклона на ефективність сепарації пилу з газового потоку. Автори застосували метод обчислювальної гідродинаміки (CFD) для моделювання тривимірного поля швидкостей та розподілу твердих частинок у потоці. Для опису турбулентності використано стандартну двопараметричну модель $k-\epsilon$, а рух частинок враховувався через модель Лагранжа, яка дозволяє відстежувати індивідуальні траєкторії частинок різного розміру. В результаті моделювання встановлено, що розподіл концентрації частинок по перерізах циклона значно залежить від форми вхідного патрубку, кута завихрення і швидкості потоку. Зокрема, зміна кута нахилу вхідного патрубку впливала на утворення більш виразного спірального потоку, що сприяло покращенню осадження більшої кількості частинок. Також у роботі показано, що ефективність сепарації безпосередньо пов'язана з розміром частинок: великі частинки швидше відокремлюються внаслідок відцентрових сил, тоді як дрібні частинки можуть залишатися в газовому потоці довше, що знижує загальну ефективність. Автори відзначають, що їх модель може слугувати ефективним інструментом для оптимізації конструкції циклона і вибору режимів роботи, що дозволяє підвищити якість очищення газу від пилу при мінімальних енергетичних витратах.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Виконаний вище аналіз науково-технічних джерел обґрунтовує вибір чисельних методів моделювання, зокрема обчислювальної гідродинаміки (CFD), є необхідним етапом дослідження процесів у мультициклонних пилоуловлювачах, з огляду на складність аеродинамічної структури внутрішніх потоків та впливу геометричних параметрів на ефективність очищення газів. Традиційні аналітичні або емпіричні моделі, хоча й дозволяють отримати загальні уявлення про роботу циклона, не здатні повноцінно врахувати тривимірну природу турбулентних вихрових рухів, взаємодію між окремими циклонами у багатомодульних системах, а також транспорт і осадження частинок пилу різної фракційності. Використання CFD-моделей з відповідним вибором турбулентної моделі та підходу до опису дисперсної фази (наприклад, дискретна фа-

зова модель — DPM) дозволяє дослідити розподіл швидкостей, зон рециркуляції, локальні значення концентрації частинок та їхні траєкторії, що вкрай важливо для оптимізації конструкції пилоуловлювача. Крім того, чисельне моделювання забезпечує гнучкість у варіюванні параметрів експлуатації без необхідності проведення дорогих фізичних експериментів, дозволяючи ефективно прогнозувати ефективність уловлювання пилу в умовах реальної експлуатації. Таким чином, застосування CFD-технологій є обґрунтованим з позиції точності, глибини аналізу та економічної доцільності.

Мета та завдання досліджень

Метою даної роботи є моделювання потоку забрудненого газу через мультициклонний пилоуловлювач ГП-604, зображений на рисунку 1. Відповідно до мети сформулюємо задачі досліджень: розробити та верифікувати CFD-модель (у середовищі ANSYS Fluent) для симуляції газопилового потоку в мультициклонному пилоуловлювачі типу ГП-604, проаналізувати динаміку внутрішнього потоку газу та твердих частинок в циклоні, зокрема утворення зон рециркуляції, обертальних течій та локальних змін тиску й швидкості, вивчити вплив розміру твердих частинок на ефективність сепарації, зокрема порівняти траєкторії руху частинок різного діаметра та визначити граничні значення ефективного уловлювання, оцінити рівномірність розподілу потоку між окремими циклонами блоку і її вплив на загальну продуктивність пилоуловлювача.



Рисунок 1 – Сепаратор ГП-604

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Сепаратор розрахований на пропускну здатність 20 млн. м³/д газу та тиск 7,5 МПа. Такі сепаратори зазвичай встановлюють на компресорних станціях України для вловлювання часток пилу та олив, що могли потрапити в трубопровід із попередньої компресорної станції.

Двофазний потік природного газу та твердих часток пилу було змодельовано із застосуванням ліцензійного програмного забезпечення ANSYS Fluent R18.1 Academic. У середовищі програми потік газу моделюють шляхом аналітичного розв'язання рівняння Нав'є-Стокса (1) та рівняння неперервності (2)

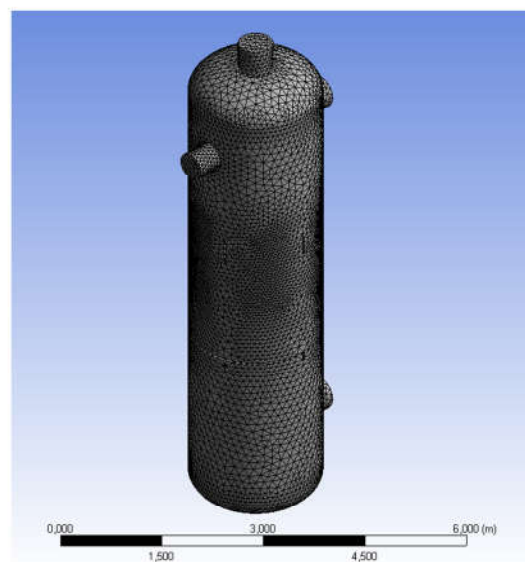
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + f_i, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0. \quad (2)$$

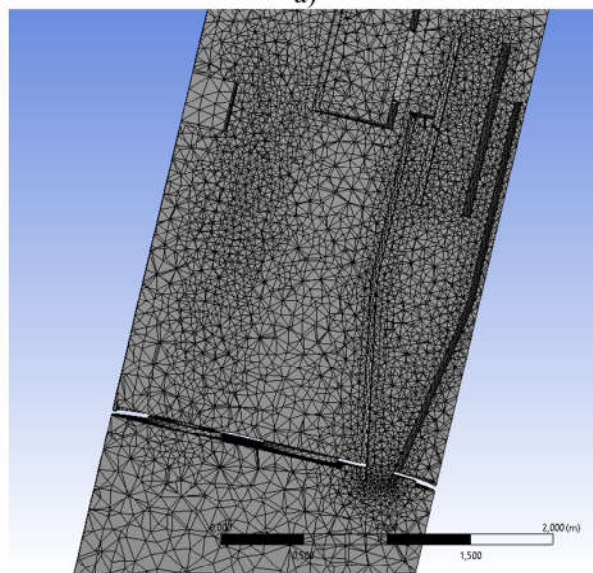
Рух твердих частинок моделюється за допомогою моделі дискретної фази Discrete Phase Model (DPM), у якій частинки розглядаються як дискретні сфери, що мають масу, але нехтують їхнім об'ємом при розрахунку об'ємної частки фаз. Рух кожної частинки визначається із врахуванням сил, що діють з боку газової фази. Ця модель досить точно описує рух малих частинок, розмірами яких можна знехтувати, однак її не можна використовувати для моделювання фази із певним об'ємом. Для моделювання потоку пилу, розмір якого зазвичай не перевищує декількох десятків мікрометрів, ця модель цілком підходить.

Було створено тривимірну модель циклона у програмі SpaceClaim, що входить в пакет ANSYS [7,8] та створено сітку моделі. Спочатку було згенеровано тетраедричну сітку з 104950 вузлами та 500850 елементами (рис. 2). Після цього вона була перетворена на поліедричну з 136864 комірками, 814744 гранями та 646652 вузлами (рис. 3) для підвищення якості сітки.

В середовищі програми були задана модель DPM, а також так звана модель турбулентності k-ε для газового потоку, що базується на розв'язанні рівняння дисипації турбулентної енергії. Також в модель було включено рівняння енергії для врахування стисливості газу, тобто зміни його густини із зміною тиску.



а)



б)

Рисунок 2 – Модель сепаратора із тетраедричною сіткою (розробка автора)

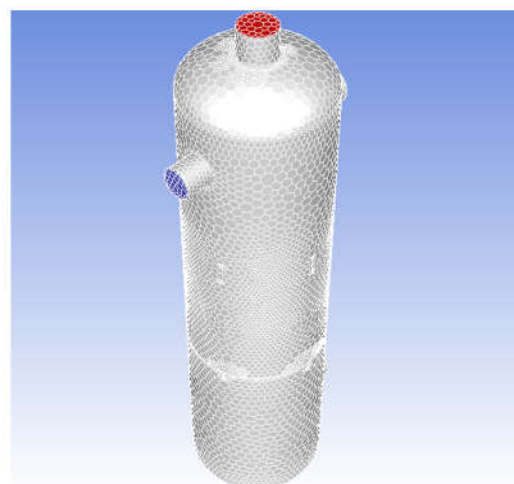


Рисунок 3 – Модель сепаратора із поліедричною сіткою (розробка автора)

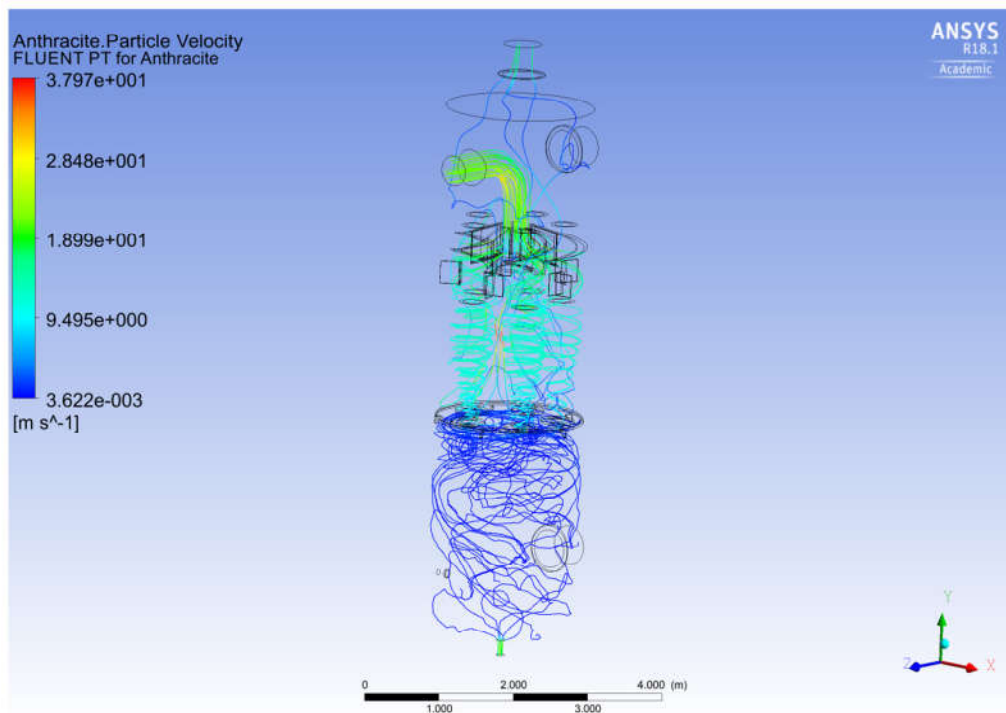


Рисунок 4 – Візуалізовані треки руху частинок пилу (розробка автора)

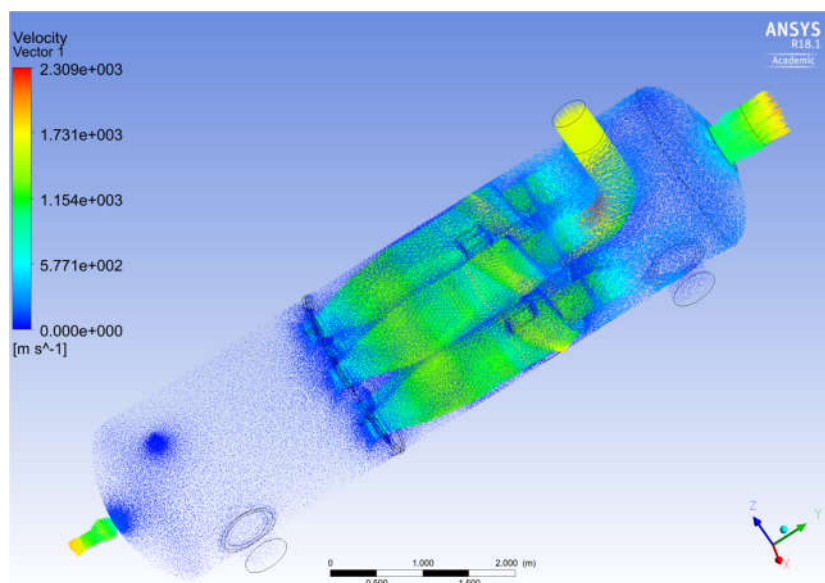


Рисунок 5 – Векторне поле швидкості частинок у сепараторі (розробка автора)

Для розрахунку програмі було задані необхідні дані про фізичні властивості компонентів та граничні умови. В якості газу було вибрано метан, в якості матеріалу твердої фази – антрацит. Було задано частинки різних діаметрів, від 1 до 100 мкм. Як граничні умови, була задана швидкість руху частинок на вході – 21 м/с та тиск на виході – 7,46 МПа. Кількість ітерацій була задана 500, увесь розрахунок зайняв близько 5 годин.

Візуалізовані результати розрахунку можна бачити на рисунку 4.

На рисунку 4 зображено траєкторії руху твердих частинок, візуалізовані градієнтом їхньої швидкості. Як видно з ілюстрації, частинки, що надходять через вхідний патрубок, закручуються у циклонних елементах і спрямовуються у нижню камеру. У цій секції їхні швидкості суттєво зменшуються, практично до нуля, внаслідок чого більшість частинок осідає в нижній частині сепаратора. Проте незначна частина частинок не вловлюється циклонними елементами і піднімається вгору разом з очищеним газом.

Векторне поле швидкості (рис. 5) дає краще розуміння того, що відбувається з потоком.

Як видно, швидкість у нижній частині посудини або дуже мала, або практично дорівнює нулю. Найбільша швидкість зосереджена в місці, де вхідна труба згинається вниз.

Зображення змін тиску показано на рисунку 6.

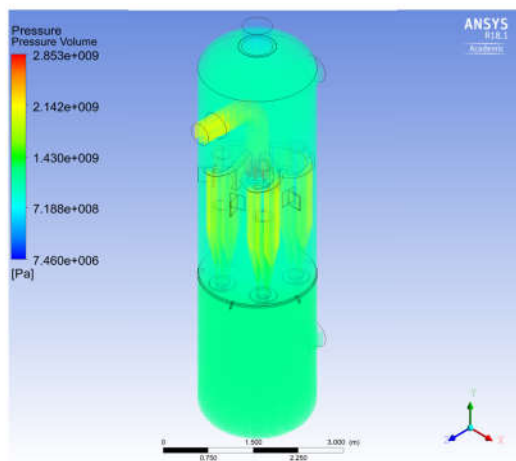


Рисунок 6 – Розподіл та зміна тиску у сепараторі (розробка автора)

Як видно, тиск газу залишається рівномірним майже в усіх частинах резервуара, а точка найвищого тиску розташована в кінці великої вхідної труби, де потік газу торкається нижньої стінки, що видно із заливки перерізу сепаратора по тиску.

Було порівняно роботу сепаратора із частинками різних діаметрів, в результаті чого було встановлено, що відносно частинок діаметрами 12-23 мкм ефективність апарата досягає 95-99%, в той час як менші частинки з діаметрами 1 мкм і менше вловлюються лише на 87-90%. Ці цифри є досить близькими до реальних номінальних показників сепаратора, що вказує на точність проведеного розрахунку.

Застосувавши лагранжевий підхід у ANSYS Fluent [9,10], ми змогли змодельовати рух твердих частинок у багатофазному потоці природного газу через пилоуловлювач компресорної станції. Моделювання проводили з використанням геометрії, ідентичної промисловим зразкам, що дозволило отримати точні кількісні дані про траєкторії руху та швидкості частинок різного розміру у потоці природного газу. Візуалізація траєкторій частинок за швидкістю (від 2 до 15 м/с) та діаметром (від 1 до 50 мкм) надала детальну інформацію про динаміку багатофазного потоку. Отримані результати показали, що ефективність уловлю-

вання частинок залежить від їх розміру і швидкості руху. Ці дані є основою для оптимізації конструктивних параметрів пилоуловлювачів, що сприяє підвищенню ефективності відділення забруднюючих часток і зменшенню навантаження на компресорне обладнання. В результаті підвищується надійність і тривалість експлуатації обладнання, знижуються експлуатаційні витрати та ризики аварійних ситуацій.

Висновки

Використання CFD-моделювання з урахуванням турбулентності (модель k-ε) забезпечує точний опис процесів сепарації. Впровадження CFD-симуляцій у технологічний процес розробки дозволяє значно скоротити час і фінансові ресурси на створення та тестування нових моделей обладнання, замінивши дорогі фізичні експерименти вітчизняними комп'ютерними дослідженнями. Крім того, можливість моделювання різних режимів роботи та екстремальних умов експлуатації дає змогу передбачати та запобігати потенційним проблемам, підвищуючи безпеку і стабільність роботи газотранспортних систем.

Таким чином, застосування описаних методів має безпосереднє прикладне значення для промисловості і сприяє впровадженню інноваційних технологічних рішень у сфері транспортування і очищення природного газу.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Серебрянський Д. О., Плашихін С. В., Безносик Ю. О., Набок О. М. Математичне моделювання очищення запиленого газового потоку в циклонах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2014. № 5(31). С. 107–111. DOI: [10.15587/1729-4061.2014.23351](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23351)
2. Новодворський В. В., Степанюк А. Р., Кичак Р. Моделювання процесу сепарації в циклонах нового дизайну. *ScienceRise: Technical Science*. 2019. № 1. С. 33–36. DOI: [10.15587/2313-8416.2018.146844](https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.146844)
3. Безносик Ю. А., Серебрянський Д. А., Плашихін С. В. Експериментальні дослідження циклофільтра в процесі вловлювання цементного пилу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2010. № 1(57). С. 3–6. URL: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/46623>
4. Серебрянський Д. О., Плашихін С. В. Стендові випробування відцентрового фільтра і циклофільтра при уловлюванні золи твердопаливного котла. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2011. № 5(79). С. 89–94.
5. Kuznetsov S. I., Mikhailik V. D., Rusanov S. A. Three-dimensional CFD analysis of gas–dust flow in a spiral cyclone separator. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2012. Vol. 85, no. 1. P. 42–49.
6. Xue X., Sun G., Wan G., Shi M. Numerical simulation of particle concentration in a gas cyclone separator. *Petroleum Science*. 2007. Vol. 4, no. 3. P. 76–83. DOI: [10.1007/s12182-007-0013-x](https://doi.org/10.1007/s12182-007-0013-x)
7. Matsson J. E. An Introduction to ANSYS Fluent 2023. Midland (MI) : SDC Publications, 2023. 356 p. ISBN 978-1-63057-586-4.
8. Lawrence K. L. ANSYS Tutorial Release 2023. Midland (MI) : SDC Publications, 2023. 464 p. ISBN 978-1-63057-570-3.
9. Gignoux C., Silvestre-Brac B. Solved Problems in Lagrangian and Hamiltonian Mechanics. Dordrecht : Springer, 2014. 325 p. ISBN 978-94-007-6963-2.
10. O'Reilly O. M. Intermediate Dynamics for Engineers: Newton–Euler and Lagrangian Mechanics. 2nd ed. Cham : Springer, 2020. 540 p. ISBN 978-3-030-44075-7.

References

1. Serebrianskyi, D. O., Plashykhin, S. V., Beznosyk, Yu. O., & Nabok, O. M. (2014). Matematychnе modeliuвання ochyshchennia zapylenoho hazovoho potoku v tsyklonakh (Mathematical modeling of cleaning dust-laden gas flows in the cyclone dust collector). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, (31)5, 107–111. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23351> [in Ukrainian]
2. Novodvorskyi, V. V., Stepaniuk, A. R., & Kychak, R. (2019). Modeliuвання protsesu separatsii v tsyklonakh novoho dyzainu (Simulation of the collecting process in a cyclone apparatus of a new design). *ScienceRise: Technical Science*, (1), 33–36. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.146844> [in Ukrainian]
3. Beznosyk, Yu. A., Serebrianskyi, D. A., & Plashykhyn, S. V. (2010). Eksperymentalni doslidzhennia tsyklofiltra v protsesi vlovliuvannia tsementnoho pyly. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh, 1(57), 3–6. <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/article/view/46623> [in Ukrainian]
4. Serebrianskyi, D. O., & Plashykhin, S. V. (2011). Stendovi vyprobuвання vidtsentrovoho filtra i tsyklofiltra pry ulovliuvanni zoly tverdoplyvnoho kotla (Mathematical modeling of cleaning dust-laden gas flows in the cyclone dust collector). *Naukovi visti NTUU «KPI»*, 79(5), 89–94. [in Ukrainian]
5. Kuznetsov, S. I., Mikhailik, V. D., & Rusanov, S. A. (2012). Three-dimensional CFD analysis of gas–dust flow in a spiral cyclone separator. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 85(1), 42–49.
6. Xue, X., Sun, G., Wan, G., & Shi, M. (2007). Numerical simulation of particle concentration in a gas cyclone separator. *Petroleum Science*, 4(3), 76–83. <https://doi.org/10.1007/s12182-007-0013-x>
7. Matsson, J. E. (2023). *An Introduction to ANSYS Fluent 2023*. SDC Publications.
8. Lawrence, K. L. (2023). *ANSYS Tutorial Release 2023*. SDC Publications.
9. Gignoux, C., & Silvestre-Brac, B. (2014). *Solved Problems in Lagrangian and Hamiltonian Mechanics*. Springer.
10. O'Reilly, O. M. (2020). *Intermediate Dynamics for Engineers: Newton–Euler and Lagrangian Mechanics* (2nd ed.). Springer.

OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF A MULTICYCLONE DUST COLLECTOR IN THE CONDITIONS OF COMPRESSOR AND GAS DISTRIBUTION STATIONS BASED ON CFD MODELING

Doroshenko Yu. I.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7196-9383>
e-mail: yuliia.doroshenko@nung.edu.ua

Liuta N. V.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3321-0982>
e-mail: natalia.liuta@nung.edu.ua

Abstract. This article presents the results of a numerical model of the natural gas purification process in a GP-604 multi-cyclone dust collector, which is used at compressor stations on main gas pipelines to remove solid mechanical impurities before gas is supplied to turbocompressor units. Due to the complex structure of the internal flows and the interaction between the gas and solid phases, the study was conducted using computational fluid dynamics (CFD) methods within the ANSYS Fluent R18.1 software environment. Turbulence was described using the $k-\epsilon$ model, which allows for flow mixing and vortex structure formation. The motion of the dispersed phase was reproduced using a discrete phase model (DPM), which enabled the trajectories of particles in the flow to be determined and their deposition efficiency in different zones of the apparatus to be assessed. Regularities in the formation of rotating flows and recirculation zones, as well as their influence on the hydrodynamics inside the multicyclone, have been established. This is of great importance for increasing cleaning efficiency. The deposition efficiency as a function of particle size has been calculated: for diameters of 12–23 μm , it reaches 95–99%, whereas for particles smaller than 5 μm , it is approximately 87–90%. Additionally, an analysis of the influence of gas flow velocity, cyclone geometry and input flow distribution on device efficiency has been conducted, enabling more accurate prediction of its behaviour in different modes. The modelling results showed that cleaning efficiency largely depends on the uniformity of flow distribution between individual cyclones and the accuracy of the parameters used in the numerical model. The agreement between the obtained data and the operational characteristics of the device confirms the adequacy of the applied CFD models and their suitability for optimising dust collector designs in gas transportation systems. CFD is therefore a powerful tool for engineering analysis in the design, modernisation and maintenance of natural gas purification equipment. Further research could focus on studying the influence of the device's operating temperature and pressure conditions, analysing the behaviour of particles of different natures and densities, and optimising the geometric parameters of the multicyclone to maximise the removal of the smallest impurities. Additionally, these results could inform the development of new design solutions for dust collectors and provide recommendations for operating compressor stations under real industrial gas supply conditions.

Keywords: multicyclone; dust collector; computational fluid dynamics; CFD; natural gas; compressor station; DPM model; simulation; separation; ANSYS Fluent.