

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ГАЗОВОГО ПОТОКУ СПІРАЛЬНОГО ПРЯМОТЕЧІЙНОГО ЦИКЛОНА

<https://doi.org/10.23939/istcipa2023.59.087>

© Майструк В. В., Майструк П. В., 2025

Мета. Поставлену проблему в науково-дослідній роботі можна розв’язати за допомогою CFD дослідження структури газового потоку в спіральному прямотечієвому циклоні. **Актуальність роботи.** Знання структури газового потоку сприяє кращій оптимізації конструкції пиловловлювача. **Методика** полягає в тому, що визначення структури газового потоку спірального прямотечієвого циклона, 3D-модель якого була створена в САД-програмі, проводили за допомогою CFD-програм. **Результати.** Представлено аналіз даних розподілу швидкості і складових швидкості потоку в спіральному прямотечієвому циклоні. Проведено порівняння аеродинамічних характеристик апарату під час його роботи на лініях всмоктування та нагнітання на трьох різних за висотою поперечних перерізах. Виявлено подібності і відмінності у структурі потоку та величині швидкостей залежно від режиму роботи та положення перерізу. **Наукова новизна.** Вперше проведено дослідження структури газового потоку в спіральному прямотечієвому циклоні. **Практична значущість.** Аналіз структури газового потоку є важливим для розуміння процесів сепарації та оптимізації конструкції циклона.

Ключові слова: спіральний прямотечієвий циклон, швидкість, тангенціальна складова швидкості, радіальна складова швидкості, осьова складова швидкості, режим нагнітання, режим всмоктування.

Вступ

Циклонні апарати залишаються одними з найпоширеніших пристроїв для очищення газів від пилу завдяки своїй простоті конструкції, надійності в експлуатації та низьким капітальним витратам. Підвищення ефективності їх роботи та зниження енергоспоживання є актуальним науково-технічним завданням, що стимулює дослідників зі всього світу шукати нові шляхи оптимізації їх конструктивних та режимних параметрів. В останні два десятиліття ключовим інструментом для поглибленого вивчення аеродинамічних процесів у циклонах стало комп’ютерне моделювання (CFD – Computational Fluid Dynamics). CFD-технології дають змогу детально візуалізувати та аналізувати поля швидкостей, тиску і траєкторії руху частинок, що було неможливо під час використання лише емпіричних та аналітичних методів.

Аналіз літературних джерел

В українській і зарубіжній літературі є велика кількість досліджень з визначення структури газових потоків у пиловловлювачах різних конструкцій. CFD сьогодні є стандартизованим інструментом для дослідження внутрішньої структури потоку (вихрові поля, вторинні течії, розподіл тиску) і дає змогу прогнозувати такі ключові параметри, як перепад тиску, ефективність вловлення частинок (d_{50}) та швидкість виносу частинок. Це підтверджують численні роботи [1, 2]. Ефективність роботи пиловловлювачів значною мірою залежить від структури газового потоку в апараті [3]. В роботі [4] встановлено, що збільшення температури газового потоку на вході зменшує ефективність вловлення вискодисперсної золи, а наявність теплообмінної поверхні збільшує гідравлічний опір апарата, але також збільшує його ефективність вловлення пилових частинок розміром менше 10 мкм.

Значну увагу дослідники надають конічній частині апарата. В роботі [5] представлено оцінку впливу розмірів конуса на продуктивність, гідродинаміку та відцентрові сили газових циклонів. Також досліджено вплив встановлення додаткового контрконуса в нижній частині апарата [6]. CFD моделювання показало, що такий елемент стабілізує вихровий потік біля пилового виходу, зменшує інтенсивність осьового висхідного потоку в центрі та підвищує загальну ефективність вловлювання, особливо для частинок розміром менше 10 мкм.

Сучасні дослідження спрямовані не лише на аналіз, а й на синтез нових, ефективніших конструкцій. Використання CFD у поєднанні з методами оптимізації дає змогу автоматизувати пошук оптимальних геометричних співвідношень. Наприклад, у роботі [7] проводилася оптимізація для досягнення максимальної ефективності при заданому обмеженні на втрати тиску.

Крім класичних конструкцій, CFD використовується для аналізу інноваційних апаратів. Дослідження [8] присвячене моделюванню багатоканальних циклонів, які дають змогу підвищити продуктивність під час збереження високої ефективності. В роботі [9] за допомогою комбінованого методу CFD-DEM (Discrete Element Method) аналізували роботу циклонів у складі систем циркулюючого киплячого шару, враховуючи взаємодію частинок між собою при високих концентраціях.

Проведений аналіз наукових публікацій свідчить про глобальну тенденцію до використання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) як основного інструменту для дослідження та оптимізації циклонів.

Щоразу більші вимоги до екологічних показників сучасних виробництв, якості готової продукції, енерго- і ресурсозбереження та створення безвідходних технологій потребують подальшого підвищення ефективності роботи наявних пилоочисних апаратів, а також створення нових пиловловлювальних апаратів для конкретного виробництва.

Мета роботи

Поставлену проблему в науково-дослідній роботі можна вирішити за допомогою CFD дослідження структури газового потоку в нових пиловловлювальних апаратах.

Методика проведення досліджень

Об'єктом досліджень в цій роботі є спіральний прямотечійний циклон [10], принципова схема якого представлена на рис. 1.

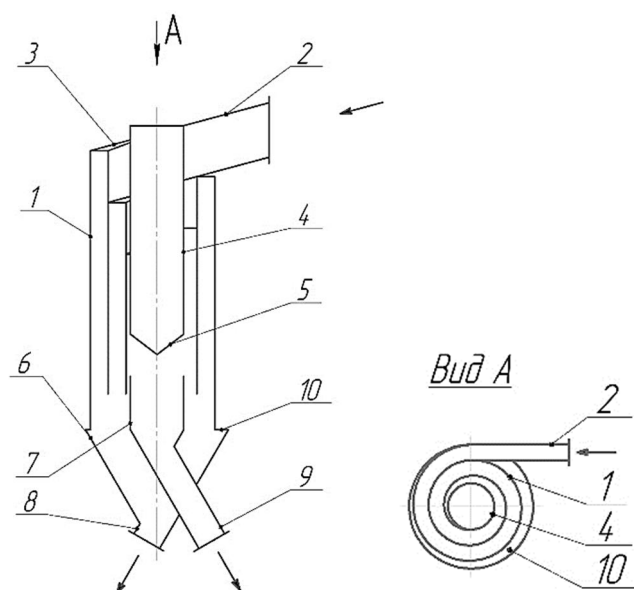


Рис. 1. Принципова схема спірального прямотечійного циклона
Fig. 1. Schematic diagram of a spiral direct-flow cyclone

Спіральний прямотечійний циклон (рис. 1) складається з вертикально розміщеного корпусу, верхня частина 1 якого у поперечному перерізі має вигляд спіралі Архімеда, зверху закритий гвинтоподібною кришкою 2, до якої закріплений стабілізатор 3, дно 4 якого виконано у формі конуса, коаксіальної вставки 5, тангенціального вхідного патрубку 6, встановленого під кутом відносно твірної верхньої частини корпусу 1, патрубків 7 і 8 для відведення осажденного пилу і очищеного газового потоку відповідно та з'єднувального фланця 9, який з'єднує верхню 1 і нижню 10 частини корпусу.

Спіральний прямотечійний циклон працює таким способом. Запилений газ надходить через тангенціальний вхідний патрубок 6 у спіральний канал кільцевого простору верхньої частини корпусу 1, який зверху обмежений кришкою 2 у вигляді гвинтової конусної спіралі навколо осі обертання стабілізатора 3 і закручується. Під дією відцентрових сил, які виникають під час обертання потоку, частини пилу відкидаються до периферії, рухаються вниз вздовж стінки верхньої частини корпусу 1, далі через кільцевий зазор між нижньою частиною корпусу 10 і коаксіальною вставкою 5 і відводяться по патрубку для відведення пилу 7. Очищений газ потрапляє у простір коаксіальної вставки 5 і відводиться через патрубок для відведення очищеного газу 8.

Для дослідження структури газового потоку вищеописаної конструкції спірального прямотечійного циклона за допомогою CFD-програм, у САД-програмі була створена 3D-модель апарата, розміри вхідного патрубку якого такі самі, як у стандартного циклона ЦН-15 діаметром 150 мм. Вихідними параметрами для дослідження створеної 3D-моделі апарату були характеристики повітряного потоку: атмосферний тиск за нормальних умов $P_0 = 101325$ Па; температура середовища за нормальних умов $T_0 = 293$ К; густина повітря $\rho = 1,293$ кг/м³. Для розрахунку задавали такі граничні умови: відкритий потік – об'ємна витрата (0,07065 м³/с); відкритий тиск – тиск навколишнього середовища; стіна – реальна стінка. Значення об'ємної витрати відповідали значенню швидкості у вхідному патрубку 23,55 м/с. Для стандартного циклона ЦН-15 діаметром 150 мм вказана швидкість у вхідному патрубку відповідає фіктивній швидкості в апараті 4 м/с, яка є рекомендованою для пиловловлювальних апаратів вказаного типу. Дослідження проводили для випадків, коли циклон працює на лінії нагнітання і на лінії всмоктування.

Для симуляції процесу, коли апарат працює на лінії нагнітання, як граничні умови на вході в апарат задавали: відкритий потік – об'ємна витрата на вході $Q_{вх}$ м³/с, а на виході: відкритий тиск – тиск навколишнього середовища $P_{вих}$, Па. Якщо апарат працює на лінії всмоктування, то на вході задавали відкритий тиск – тиск навколишнього середовища $P_{вх}$, Па, а на виході з апарата: відкритий потік – об'ємна витрата на виході $Q_{вих}$ м³/с.

Результати досліджень та їх обговорення

В цій роботі з метою визначення структури газового потоку в спіральному прямотечійному циклоні проведено дослідження зміни швидкості, тангенціальної, радіальної та осьової складової швидкості по радіусу і висоті апарата для різних режимів роботи апарата.

Аналіз поля швидкостей

На відстані 200 мм від площини переходу до конічної частини, у верхній зоні апарата, профіль швидкості має порівняно просту і симетричну форму (рис. 2а). Спостерігається чітко виражений двопіковий профіль, характерний для вихрових потоків у кільцевих каналах. Максимуми швидкості досягаються поблизу зовнішньої стінки корпусу (при радіусах приблизно менше 0,07 м та більше 0,085 м), що свідчить про інтенсивний обертальний рух основного потоку, який несе частинки пилу. Швидкість у центральній зоні, поблизу осі апарата, є мінімальною. Профіль швидкості для режиму нагнітання демонструє дещо вищі пікові значення (до 29 м/с) порівняно з режимом всмоктування (до 23 м/с). Це вказує на те, що під час роботи на нагнітанні потік отримує більшу кінетичну енергію, що потенційно може покращити ефективність сепарації збільшенням відцентрових сил.

Під час наближення до конічної частини структура потоку суттєво ускладнюється (рис. 2б). Профіль швидкості втрачає свою симетрію та гладкість. З'являються локальні екстремуми та зони з різкими градієнтами швидкості, особливо в області радіусів від 0,04 м до 0,09 м. Це свідчить про

розвиток вторинних течій та підвищену турбулентність потоку, викликану зміною геометрії та взаємодією потоків біля коаксiальної вставки. Пікові значення швидкості залишаються високими (приблизно 27 м/с). Як і в попередньому перерізі, режим нагнітання показує загалом вищі значення швидкості по всьому радіусу. Розбіжність між кривими стає помітнішою в периферійній зоні, що підтверджує тенденцію до енергійнішого потоку під час роботи на нагнітання.

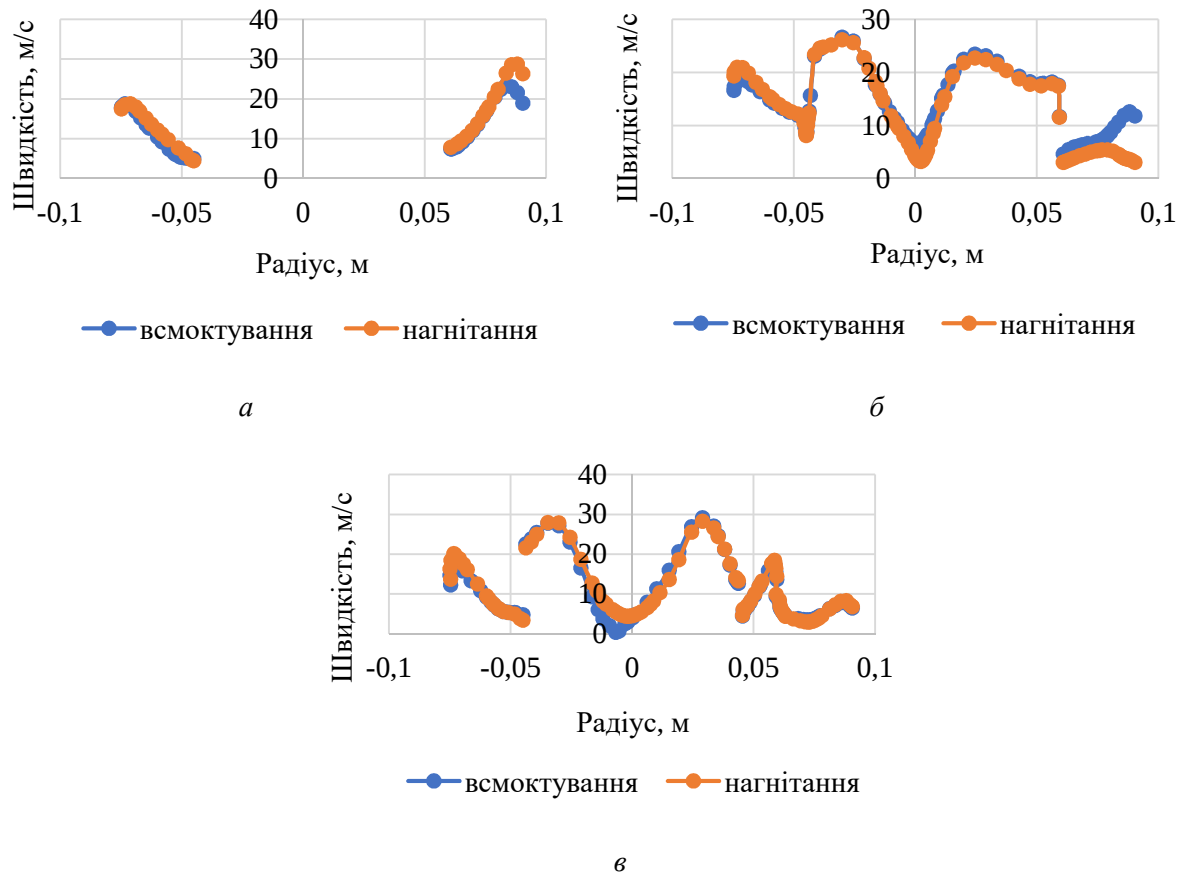


Рис. 2. Розподіл швидкості в сепараційному просторі:

a – у площині, яка розташована вище площини переходу циліндричної частини в конічну на 200 мм; *б* – у площині, яка розташована вище площини переходу циліндричної частини в конічну на 50 мм;

в – у площині переходу циліндричної частини в конічну

Fig. 2. Velocity distribution in the separation space:

a – in the plane that is 200 mm above the plane of transition of the cylindrical part into the conical part;

b – in the plane that is 50 mm above the plane of transition of the cylindrical part into the conical part;

c – in the plane of transition of the cylindrical part into the conical part

У перерізі, де циліндрична частина корпусу переходить у конічну, спостерігається найскладніша гідродинамічна картина (рис. 2в). Профіль швидкості є сильно нерівномірним, з великою кількістю локальних піків та провалів. Особливо виражена ця нерівномірність в правій частині графіка, де фіксуються три піки швидкості. Це може бути пов'язано з інтенсивним перерозподілом потоку перед його розділенням на очищений газ та пиловий концентрат. Режим нагнітання знову демонструє перевагу в пікових значеннях швидкості, досягаючи майже 30 м/с, тоді як для режиму всмоктування максимальна швидкість становить близько 29 м/с. Характер профілів для обох режимів залишається схожим, що вказує на те, що основні гідродинамічні структури визначаються геометрією апарата, а режим роботи впливає переважно на енергетичні характеристики потоку.

Аналіз поля тангенціальної складової швидкості

На рис. 3а представлено профіль тангенціальної складової швидкості у верхній частині циклона, де відбувається початкове формування вихрового потоку. Профіль потоку є асиметричним, що відображає зону безпосередньо після тангенціального входу. Тангенціальна складова швидкості зростає зі збільшенням радіуса, що характерно для початкової стадії закручування потоку, яка нагадує обертання квазітвердого тіла. Режим нагнітання демонструє дещо вищі пікові значення тангенціальної складової швидкості, що сягають майже 23 м/с. Це свідчить про інтенсивнішу початкову закрутку потоку під час роботи під надлишковим тиском. Для режиму всмоктування максимальна швидкість трохи нижча і становить близько 20 м/с. У зоні формування вихору режим нагнітання забезпечує енергійніший потік.

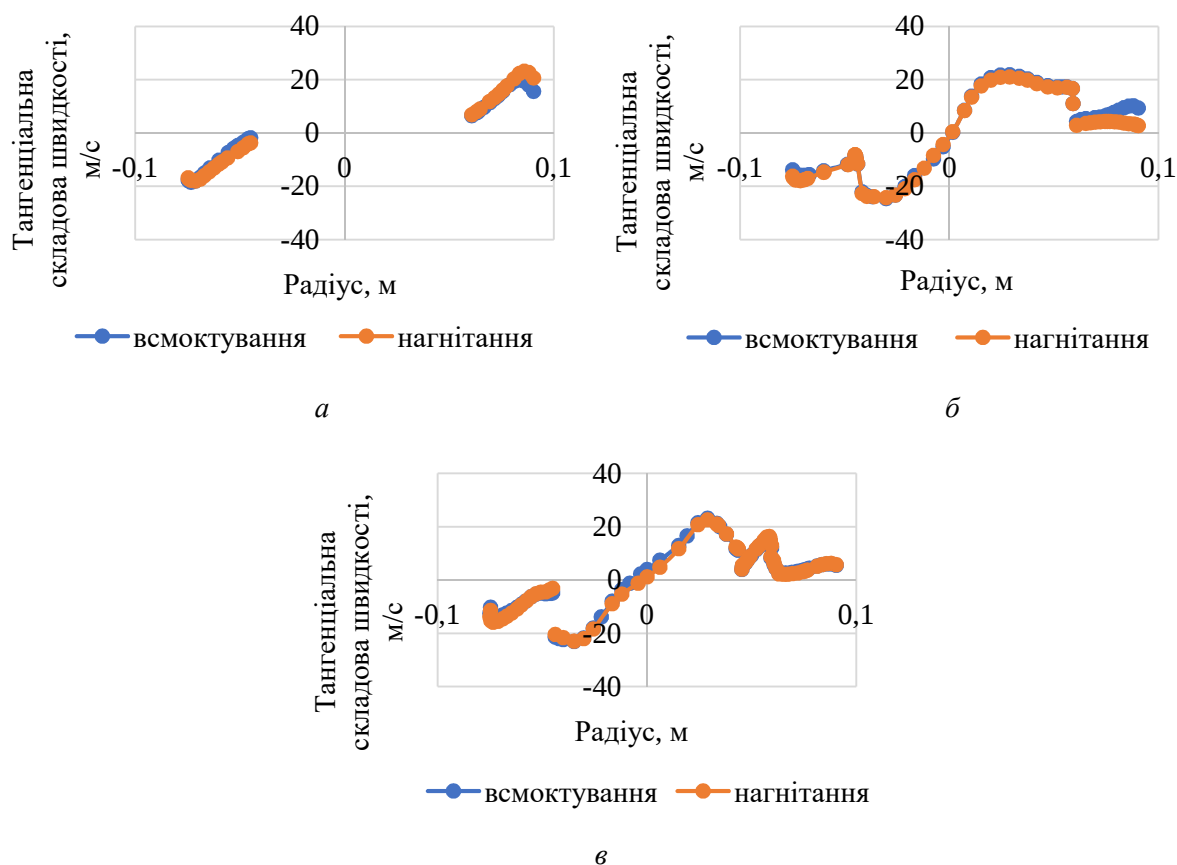


Рис. 3. Розподіл тангенціальної складової швидкості в сепараційному просторі:
 а – у площині, яка розташована вище площини переходу циліндричної частини в конічну на 200 мм;
 б – у площині, яка розташована вище площини переходу циліндричної частини в конічну на 50 мм;
 в – у площині переходу циліндричної частини в конічну

Fig. 3. Distribution of the tangential component of velocity in the separation space:
 а – in the plane that is 200 mm above the plane of transition of the cylindrical part into the conical part;
 б – in the plane that is 50 mm above the plane of transition of the cylindrical part into the conical part;
 в – in the plane of transition of the cylindrical part into the conical part

На рис. 3б показано профіль тангенціальної складової швидкості в перерізі 50 мм вище переходу, де вихрова структура вже є стабілізованою. Профіль набуває характерних рис вихору Ренкіна: центральна частина з лінійним зростанням швидкості (обертання твердого тіла) та периферійна зона, де швидкість починає зменшуватися (вільний вихор). Максимальні значення тангенціальної складової швидкості спостерігаються на радіусі приблизно 0,03 м. У центральній, найважливішій для сепарації зоні (радіус від $-0,04$ м до $+0,04$ м), профілі для обох режимів практично

повністю збігаються. Максимальна тангенціальна складова швидкості в обох випадках становить приблизно 22 м/с. Незначні відмінності спостерігаються лише біля периферійних стінок апарата, що може бути пов'язано з особливостями взаємодії потоку з поверхнею в умовах розрідження та надлишкового тиску. Це свідчить про те, що після початкової стабілізації потоку основна структура вихору стає незалежною від способу під'єднання апарату.

На рис. 3в зображено профіль тангенціальної складової швидкості безпосередньо в площині переходу до конічної частини – ключовій зоні, де відбувається розділення потоків очищеного газу та пилу. Профіль зберігає стабільну структуру вихору Ренкіна. Пікові значення швидкості залишаються на рівні приблизно 22–23 м/с, що вказує на досягнення вихором максимальної інтенсивності. Ключовим спостереженням є те, що, як і в попередньому перерізі, криві для режимів всмоктування та нагнітання в ядрі вихору майже ідентичні. Локальні флуктуації та розбіжності на периферії зумовлені складною геометрією кільцевого зазору для відведення пилу.

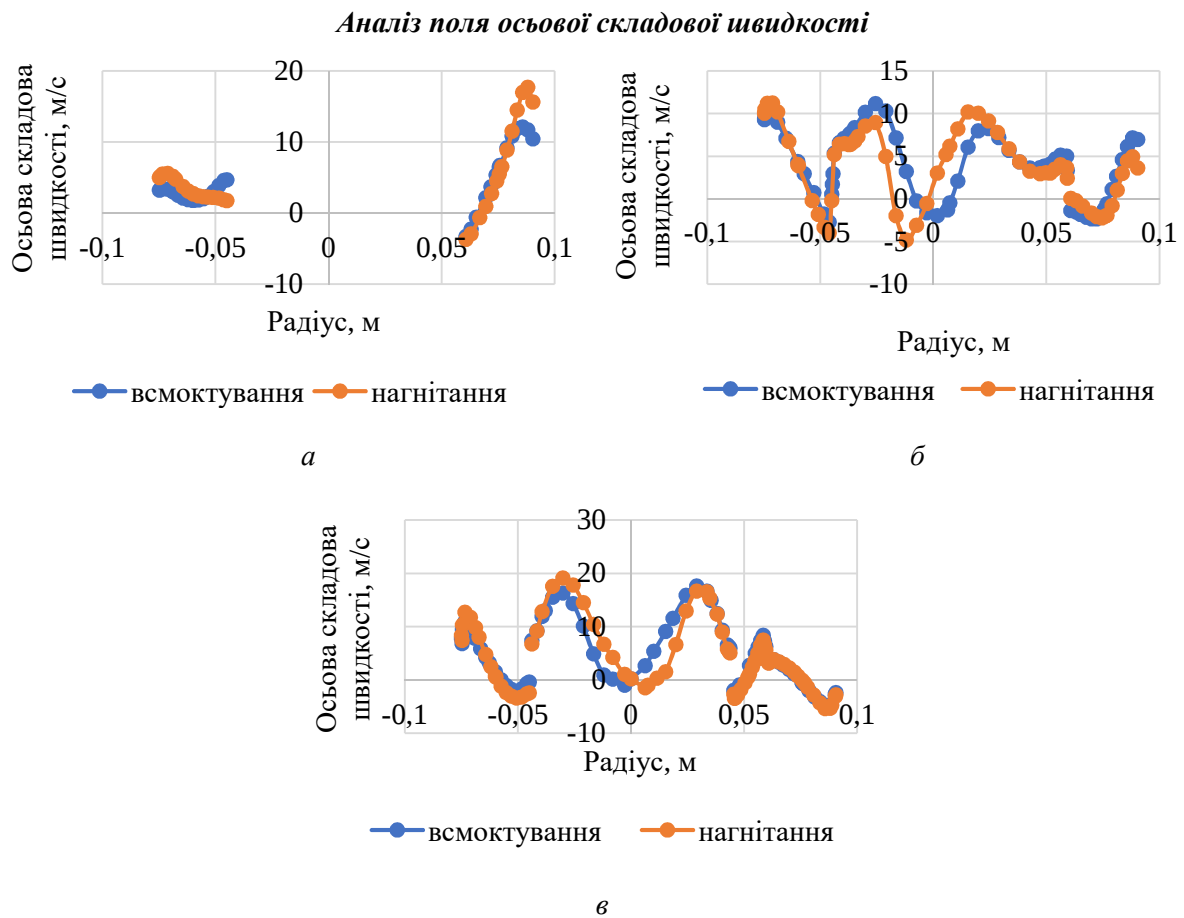


Рис. 4. Розподіл осьової складової швидкості в сепараційному просторі:
а – у площині, яка розташована вище площини переходу циліндричної частини в конічну на 200 мм; б – у площині, яка розташована вище площини переходу циліндричної частини в конічну на 50 мм;
в – у площині переходу циліндричної частини в конічну

Fig. 4. Distribution of the axial velocity component in the separation space:
а – in the plane that is 200 mm above the plane of transition of the cylindrical part into the conical part;
б – in the plane that is 50 mm above the plane of transition of the cylindrical part into the conical part;
с – in the plane of transition of the cylindrical part into the conical part

На рис. 4а показано розподіл осьової складової швидкості в кільцевому просторі на відстані вище 200 мм від зони переходу циліндричної частини в конічну. Профіль осьової складової швидкості є виражено нерівномірним та асиметричним. Спостерігаються дві основні зони прямого (низхідного)

поток, що відповідають позитивним значенням швидкості, та менш виражені зони зворотних течій. Це свідчить про складний вихровий рух газу, що формується одразу після вхідного патрубка. Режим нагнітання характеризується вищими піковими значеннями осьової складової швидкості, особливо в правій частині графіка, де швидкість досягає понад 17 м/с. Профіль виглядає більш згладженим. Режим всмоктування демонструє менші максимальні швидкості (пік близько 12 м/с). Профіль має більше локальних екстремумів, що може свідчити про вищу турбулентність або наявність дрібномасштабних вихорів. На цій висоті потік ще не є стабілізованим, однак вже помітно, що робота на лінії нагнітання створює інтенсивніший низхідний потік в окремих зонах.

На рис. 4б представлено аналогічний розподіл, але на відстані вище 50 мм від конічної частини. Профіль швидкості стає більш структурованим. Чітко виділяються дві основні зони низхідного потоку по обидва боки від осі та центральна зона зворотної течії (негативні значення швидкості). Це вказує на формування стабільного вихрового ядра. Режим нагнітання показує вищі пікові швидкості низхідного потоку (до 11 м/с ліворуч та 10,5 м/с праворуч). Що важливо, для цього режиму характерна значно інтенсивніша центральна зона зворотної течії, де швидкість сягає -5 м/с. Для режиму всмоктування пікові швидкості є дещо нижчими. Центральна зона зворотної течії також наявна, але її інтенсивність менша (швидкість близько -2 м/с). Наближення до зони виходу з апарата призводить до прискорення потоку та чіткого формування центральної висхідної течії, яка більш виражена під час роботи на лінії нагнітання.

На рис. 4в зображено поле осьової складової швидкості безпосередньо в площині переходу циліндричної частини в конічну, що є ключовою зоною для сепарації. У цьому перерізі спостерігаються найвищі значення осьової швидкості. Це пояснюється звуженням прохідного перерізу та направленням потоку до вихідних патрубків. Режим нагнітання демонструє значно вищі швидкості. Пікове значення сягає майже 20 м/с, тоді як для режиму всмоктування воно становить близько 16 м/с. Різниця між режимами тут є найбільш вираженою. Хоча швидкості для режиму всмоктування також високі, вони помітно поступаються режиму нагнітання. Центральна зона зворотної течії стає менш глибокою порівняно з попереднім перерізом (рис. 4б), що, ймовірно, пов'язано з перерозподілом потоку перед його розділенням.

Аналіз поля радіальної складової швидкості

На рис. 5а показано розподіл радіальної складової швидкості у верхній зоні циклона на 200 мм вище переходу, де потік тільки починає формувати стабільну вихрову структуру. Радіальна складова швидкості на цій висоті є дуже низькою (в межах $\pm 1,5$ м/с) порівняно з іншими складовими.

Це очікувано, оскільки тут домінують тангенціальний та осьовий рухи. Профіль є коливальним, що свідчить про наявність вторинних течій, але без чітко вираженого напрямку до центру чи до периферії. В цій зоні руху газового потоку суттєвих відмінностей між двома режимами роботи практично не спостерігається. Профілі радіальної складової швидкості мають схожу форму. Це свідчить про те, що у верхній частині апарата спосіб під'єднання апарата ще не має значного впливу на поперечні потоки газу.

На рис. 5б представлено профіль радіальної складової швидкості нижче, де вихор вже стабілізувався. Тут спостерігаються кардинальні відмінності для різних режимів роботи. Величина радіальної складової швидкості значно зросла, що вказує на інтенсифікацію поперечного руху газу. Режим всмоктування характеризується наявністю надзвичайно інтенсивного потоку, спрямованого до центру. Пікове значення сягає понад -6 м/с. Це означає, що в цьому режимі основна маса газу починає рухатися до центрального вихідного патрубка вже на цій висоті. Режим нагнітання демонструє цілковито протилежну картину. У тій самій зоні спостерігається потужний потік, спрямований від центру до периферії з піком понад $+4$ м/с. На цій висоті структура радіальних потоків для двох режимів є фундаментально різною. Це вказує на те, що режим роботи визначає, як і де очищений газ починає свій шлях до вихідного патрубка.

На рис. 5в зображено поле радіальної складової швидкості в площині переходу – ключовій зоні, де відбувається фінальне розділення газу та пилу. Радіальні потоки тут є найінтенсивнішими, що підтверджує, що саме в цій зоні відбувається основний перетік газу в центральну коаксіальну вставку. Режим нагнітання показує чіткий та потужний потік газу, спрямований до центру, з максимальним значенням понад -4 м/с. Така структура є аеродинамічно сприятливою для сепарації: газ рухається всередину до виходу, тоді як частинки пилу завдяки інерції продовжують рух до периферії. Режим всмоктування, навпаки, демонструє потік, спрямований від центру з піком $+2$ м/с. Така структура є вкрай несприятливою для ефективного очищення. Потік газу, що рухається назовні в зоні біля виходу, може перешкоджати осадженню частинок і навіть спричиняти їх повторне захоплення.

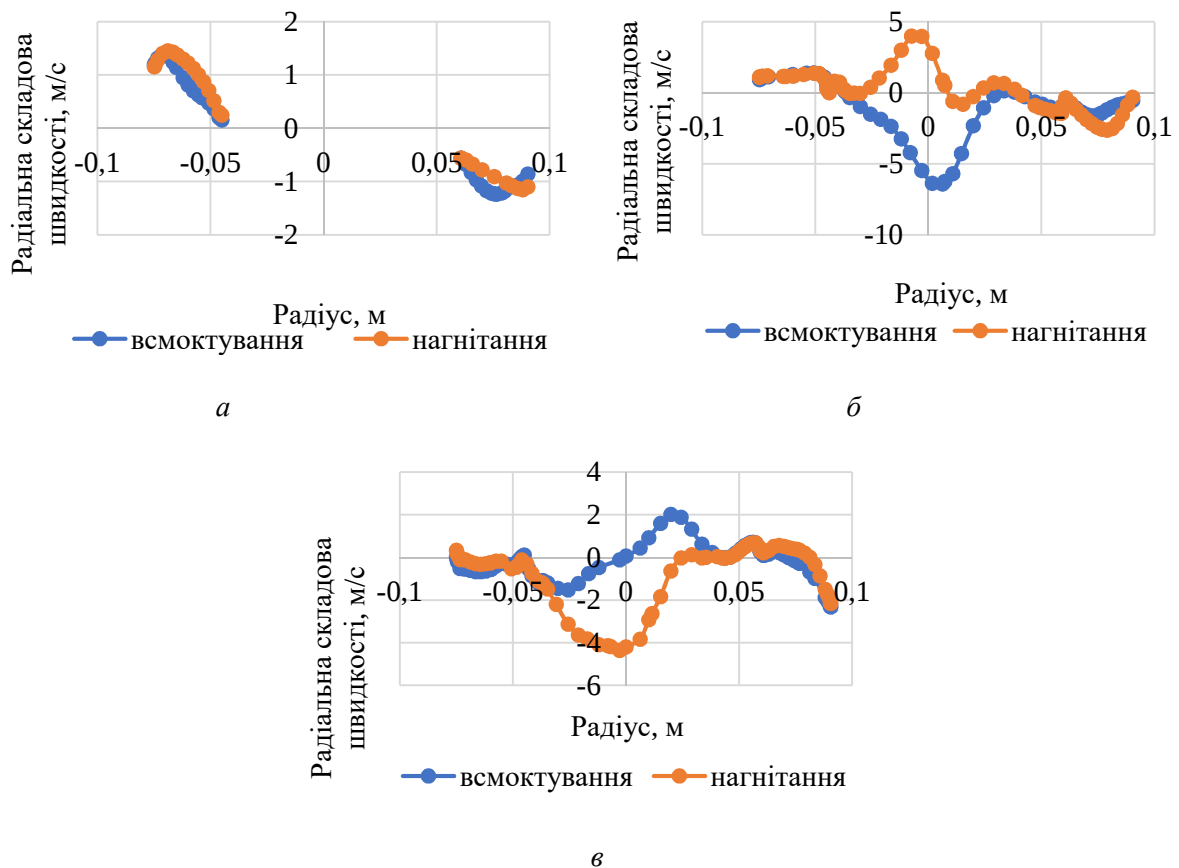


Рис. 5. Розподіл радіальної складової швидкості в сепараційному просторі:
а – у площині, яка розташована вище площини переходу циліндричної частини в конічну на 200 мм; б – у площині, яка розташована вище площини переходу циліндричної частини в конічну на 50 мм;
в – у площині переходу циліндричної частини в конічну

Fig. 5. Distribution of the radial component of velocity in the separation space:
а – in the plane that is 200 mm above the plane of transition of the cylindrical part into the conical part;
б – in the plane that is 50 mm above the plane of transition of the cylindrical part into the conical part;
с – in the plane of transition of the cylindrical part into the conical part

Висновки

Аналізуючи отримані результати досліджень, можна зробити такі висновки:

1. Під час руху запиленого газу від вхідного патрубка до зони пиловідведення відбувається значне ускладнення структури потоку. Простий двопіковий профіль трансформується в складний, що свідчить про розвиток турбулентності та вторинних течій під час наближення до конічної секції. У всіх досліджених перерізах робота циклона на лінії нагнітання призводить до формування вищих швидкостей

поток, порівняно з роботою на лінії всмоктування. Вищі швидкості при режимі нагнітання створюють більші відцентрові сили, що теоретично має позитивно впливати на ефективність уловлювання частинок пилу. Однак значне ускладнення профілю швидкості та підвищена турбулентність в нижній частині апарата можуть, навпаки, сприяти вторинному виносу вже сепарованих частинок.

2. Аналіз трьох перерізів демонструє класичний процес розвитку вихрового потоку в циклоні. Початкова закрутка переходить у стабільний, інтенсивний вихор Ренкіна, який зберігає свою структуру аж до зони розділення потоків. Хоча на вході в апарат режим нагнітання створює дещо вищі тангенціальні швидкості, ця різниця нівелюється в процесі стабілізації вихору. У середній та нижній частинах корпусу, де відцентрові сили досягають максимуму і відбувається основний процес сепарації, тангенціальна складова швидкості практично не залежить від того, чи працює циклон на лінії всмоктування, чи нагнітання.

3. Під час руху запиленого газу вниз по корпусу циклона відбувається значне прискорення осьової складової швидкості, яке досягає максимуму в площині переходу до конічної частини. Структура потоку еволюціонує від порівняно хаотичної у верхній частині до чітко сформованої двопікової структури з центральною зоною рециркуляції. Робота циклона на лінії нагнітання систематично призводить до вищих пікових значень низхідної осьової швидкості в усіх досліджених перерізах. Це свідчить про формування більш інтенсивного та енергетично насиченого вихрового потоку. Крім того, в середній частині апарата цей режим генерує значно потужнішу центральну зону зворотної течії. Вищі швидкості під час роботи на нагнітанні можуть сприяти ефективнішій сепарації через збільшення відцентрових сил. Водночас інтенсивні зони зворотної течії, особливо виражені в режимі нагнітання, можуть негативно впливати на ефективність уловлювання дрібнодисперсного пилу, створюючи умови для його повторного захоплення потоком очищеного газу.

4. Радіальна складова швидкості є незначною у верхній частині циклона, але її інтенсивність різко зростає під час наближення до зони переходу в конус, де відбувається розділення потоків. На відміну від тангенціальної складової швидкості, де різниця між режимами була мінімальною, для радіальної складової швидкості режим роботи є вирішальним фактором. Структури радіальних потоків для режимів всмоктування та нагнітання у нижній частині апарата є практично дзеркально протилежними. Режим нагнітання створює аеродинамічно правильну та сприятливу для сепарації картину потоку: інтенсивний рух газу до центрального вихідного патрубку. Це забезпечує ефективне відведення очищеного газу. Режим всмоктування створює несприятливу структуру потоку з радіальними швидкостями, спрямованими від центру в зоні виходу. Це може суттєво знижувати ефективність сепарації, створюючи умови для виносу вже вловлених частинок. Отже, на основі аналізу полів радіальної швидкості можна зробити обґрунтований висновок, що для даної конструкції спірального прямооточного циклона робота на лінії нагнітання є значно ефективнішою та аеродинамічно доцільнішою.

Інформаційні джерела

1. Cortés C., Gil A. Modeling the Gas and Particle Flow inside Cyclone Separators // Progress in Energy and Combustion Science, 33 (3), 2007, s. 409–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>
2. Bogodage, S. G., Leung, A. Y. T. CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution // Powder Technology, 2015, 286, ss. 488–506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.023>
3. Майструк В. В. Дослідження структури газового потоку в циклоні з проміжним відведенням пилу. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ “ХПІ”. 2021. № 3 (9). С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.03.07>
4. Резидент Н. В., Степанова Н. Д. Дослідження показників роботи циклона-утилізатора з використанням CFD-пакета Solidworks Flow Simulation // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2022. № 2. С. 192–197. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-192-197>
5. Chuah T. G., Gimbun Jolius, Choong Thomas, S. Y. A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics // Powder Technology. Vol. 162, Issue 2, 2006, p. 126–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.12.010>

6. Saputro H. et al. The CFD simulation of cyclone separator without and with the counter-cone in the gasification process. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 288. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/288/1/012142>
7. Vegini Atilano Antônio, Meier Henry França, Iess João Jaime, and Mori Milton. Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of Cyclone Separators Connected in Series // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2008, 47 (1), p. 192–200. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie061501h>
8. Vaitiekūnas Petraitis, Venslovas Chlebnikovas, Aleksandras. Air stream velocity modelling in multichannel spiral cyclone separator // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. Vol. 22 (3). 2014. DOI: <https://doi.org/10.3846/16486897.2014.931283>
9. Chu K. W., Wang B., Xu D. L., Chen Y. X., Yu A. B. CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator // Chemical Engineering Science. Vol.66, Issue 5, 2011, p. 834–847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.11.026>
10. Спіральний прямотечійний циклон Пат. № 160126 Україна В04С 3/00 № u2025-00468. Заявл. 04.02. 2025; Опубл. 06.08.2025; Бюл. № 32.

Volodymyr Maistruk¹, Pavlo Maistruk²

¹ Lviv Polytechnic National University, Department of Design Machine and Automotive Engineering

² Lviv Polytechnic National University, Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies

STUDY OF THE STRUCTURE OF THE GAS FLOW OF A SPIRAL DIRECT-FLOW CYCLONE

Goal. The problem posed in the scientific research work can be solved using CFD research of the gas flow structure in a spiral direct-flow cyclone. **Relevance of the work.** Knowledge of the gas flow structure contributes to better optimization of the design of the dust collector. **The methodology** consists in determining the gas flow structure of a spiral direct-flow cyclone, the 3D model of which was created in the CAD program, using CFD programs. **Results.** An analysis of the velocity distribution data and flow velocity components in a spiral direct-flow cyclone is presented. A comparison of the aerodynamic characteristics of the device during its operation on the suction and discharge lines at three different cross-sections in height is carried out. Similarities and differences in the flow structure and velocity values depending on the operating mode and position of the section are revealed. **Scientific novelty.** The gas flow structure in a spiral direct-flow cyclone is studied for the first time. **Practical significance.** Analysis of the gas flow structure is important for understanding separation processes and optimizing cyclone design.

Keywords: spiral direct-flow cyclone, velocity, tangential velocity component, radial velocity component, axial velocity component, discharge mode, suction mode.

References

1. Cortés, C., Gil, A. Modeling the Gas and Particle Flow inside Cyclone Separators // Progress in Energy and Combustion Science, 33 (3), 2007, p. 409–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>
2. Bogodage, S. G., Leung, A. Y. T. CFD simulation of cyclone separators to reduce air pollution // Powder Technology, 2015, 286, p. 488–506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.08.023>
3. Maistruk, V. V. Doslidzhennya struktury hazovoho potoku v tsykloni z promizhnym vidvedennyam pyly. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI". Seriya: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh. Kharkiv: NTU "KHPI". 2021. No. 3 (9). P. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.03.07>
4. Rezydent, N. V., Stepanova, N. D. Doslidzhennya pokaznykiv roboty tsyklona-utylizatora z vykorystannyam CFD-paketa Solidworks Flow Simulation // Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi, 2022, No. 2, p. 192– 97. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-192-197>
5. Chuah, T. G., Gimbin, Jolius, Thomas, Choong, S. Y. A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics // Powder Technology. Vol. 162, Issue 2, 2006, p. 126–132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.12.010>

6. Saputro, H. et al. The CFD simulation of cyclone separator without and with the counter-cone in the gasification process. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 288. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/288/1/012142>
7. Vegini, Atilano Antônio, Meier, Henry França, Iess, João Jaime and Milton, Mori. Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of Cyclone Separators Connected in Series // Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47 (1), p. 192–200. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie061501h>
8. Vaitiekūnas, Petraitis, Venslovas, Chlebnikovas, Aleksandras. Air stream velocity modelling in multichannel spiral cyclone separator. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. Vol. 22 (3). 2014. DOI: <https://doi.org/10.3846/16486897.2014.931283>
9. Chu, K. W., Wang, B., Xu, D. L., Chen, Y. X., Yu, A. B. CFD–DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator // Chemical Engineering Science. Vol. 66, Issue 5, 2011, p. 834–847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.11.026>
10. Spiral'nyy pryamotechiynyy tsyklon Pat. No. 160126 Ukrayina B04C 3/00 No. u2025-00468. Zayavl. 04.02.2025; Opubl. 06.08.2025; Byul. No. 32.