

УДК 628.514

doi:10.20998/2413-4295.2021.03.07

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ГАЗОВОГО ПОТОКУ В ЦИКЛОНІ З ПРОМІЖНИМ ВІДВЕДЕННЯМ ПИЛУ

**В. В. МАЙСТРУК**

кафедра проектування і експлуатації машин, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, УКРАЇНА  
e-mail: vmaistruk@gmail.com

**АНОТАЦІЯ** Проаналізовано роботи, в яких досліджуються конструкції пиловловлюючих апаратів, що часто використовуються у промисловості. Показано, що ефективність роботи пиловловлювачів значною мірою залежить від структури газового потоку в апараті. На основі проведеного аналізу роботи сучасних циклонних апаратів, отримано картину процесу сепарації та виокремлено фактори, що негативно впливають на роботу пиловловлюючих апаратів. Встановлено, що прогнозування роботи пиловловлюючих апаратів в певних умовах, найефективніше проводити методами чисельного моделювання та симуляції процесу сепарації, які широко використовуються для досліджень апаратів даного типу. За допомогою методів чисельного моделювання проведено дослідження циклону з проміжним відведенням пилу. В даному циклоні досліджено зміну по радіусу апарату тангенціальної, радіальної та осьової складової швидкості. В процесі досліджень встановлено, що в сепараційному просторі тангенціальна складова швидкості збільшується від 18–20 м/с у верхній частині апарату до 22–25 м/с у зоні нижнього торця впускної труби, радіальна складова швидкості приймає значення в межах від 0 до 2 м/с, а осьова складова швидкості має максимальні значення 10–15 м/с. В конічній частині апарату тангенціальна складова швидкості зменшується від 27 м/с у верхніх площинах конічної частини апарату до 10 м/с біля пилорозвантажувального патрубку, радіальна складова швидкості має доцентровий характер, осьова складова швидкості в міру руху газового потоку до пилорозвантажувального патрубку зменшується. Встановлено, що у циліндричній частині апарату вторинним вихором з низхідного потоку у висхідний переноситься близько 60 % об'єму газового потоку, а в конічній частині відбувається перехід біля 40 % об'єму газу з низхідного потоку у висхідний. Показано, що великі значення тангенціальної складової швидкості в сепараційній зоні сприяють попаданню частинок пилу у кільцевий простір за пилорозвантажувальними отворами, а невеликі значення тангенціальної складової швидкості, осьової та радіальної у кільцевому просторі за пилорозвантажувальними отворами сприяють осадженню частинок пилу, які попали в цей простір, що позитивно впливає на роботу пиловловлюючого апарату.

**Ключові слова:** циклон з проміжним відведенням осажденного пилу; CFD-моделювання; ступінь очищення; гідравлічний опір; енергоефективність; тангенціальна, радіальна, осьова складова швидкості.

## STUDY OF THE STRUCTURE OF GAS FLOW IN A CYCLONE WITH INTERMEDIATE DUST REMOVAL

**V. MAISTRUK**

Department of Designing and Operation of Machines, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

**ABSTRACT** The works in which designs of the dust collectors, which are often used in the industry, are analyzed. It is shown that the efficiency of dust collectors largely depends on the structure of the gas flow in the apparatus. Based on the analysis of the current cyclone devices, a picture of the separation process is obtained, and the factors that negatively affect the operation of dust collectors are identified. It is established that forecasting the work of dust collecting devices in certain conditions is most effective to perform methods of numerical modeling and simulation of the separation process, which are widely used for the research of devices of this type. Using the methods of numerical simulation, the study of the cyclone with intermediate dust removal was carried out. In this cyclone, the change in the radius of the apparatus of the tangential, radial, and axial velocity components is investigated. In the course of the research, it is established that in the separation space the tangential component of velocity increases from 18–20 m/s in the upper part of the device to 22–25 m/s in the area of the lower end of the exhaust pipe, the radial component of velocity takes values from 0 to 2 m/s, and the axial component of the speed has a maximum value of 10–15 m/s. In the conical part of the apparatus the tangential component of velocity decreases from 27 m/s in the upper planes of the conical part of the apparatus to 10 m/s near the dust unloading pipe, the radial component of speed has centripetal character, the axial component of speed decreases as the gas flow to the dust unloading pipe decreases. It has been established that in the cylindrical part of the apparatus about 60 % of the gas flow volume is transferred from the downstream to the upstream by a secondary vortex, and in the conical part, about 40 % of the gas volume is transferred from the downstream to the upstream. It is shown that large values of the tangential component of velocity in the separation zone contribute to the ingress of dust particles into the annular space behind the dust unloading holes, and small values of the tangential component of velocity, axial and radial in the annular space behind the dust unloading holes has a positive effect on the operation of the dust collector.

**Keywords:** cyclone with intermediate removal of precipitated dust; CFD modeling; degree of purification; hydraulic resistance; energy efficiency; tangential, radial, axial component of velocity.

### Вступ

Найбільш часто в промисловості для очищення повітря від пилу застосовують сухі механічні

пристрої, в яких пил відокремлюється під дією сил тяжіння і відцентрової сили – циклони. Перевагою цих апаратів є їх компактність, простота конструкції,

що обумовлює низьку вартість таких пиловловлюючих установок. Основним недоліком циклонів є залежність ефективності очищення від кількості газу, що проходить через апарат.

Через збільшення викидів забруднень в атмосферу, розроблення нових високоефективних пристроїв для очищення повітря від пилу набуває важливого значення.

Потреба в ефективних інерційних пиловловлювачах вирішується зараз шляхом створення нових апаратів, наприклад, із зустрічними закрученими потоками, з акустичними й магнітними полями тощо. Але вони характеризуються складністю конструкції та дорожнечою виготовлення. В той самий час, існує інший напрямок розв'язання даної проблеми - вдосконалення конструкції окремих вузлів і газопилових трактів циклонів. Це дозволяє в ряді конструктивних рішень з найменшими економічними витратами значно збільшити ефективність очищення газів.

Для вдосконалення конструкції існуючих пиловловлюючих апаратів необхідно проаналізувати їх роботу, вивчити структуру газового потоку.

Аналіз роботи існуючих циклонних апаратів дозволив отримати реальну картину сепарації, яку можна представити наступним чином [1]. Входячи в циклон пилові частинки внаслідок інерції спочатку рухаються по прямолінійним траєкторіям. Потім дія обертового повітряного потоку викривляє їх траєкторію, при чому тим більше чим більша відстань від місця входу частинки до зовнішньої стінки циклону. Початкова ділянка руху характеризується енергійною сепарацією найбільших частинок з периферійної частини потоку. З дальшим рухом частинок тангенціальна складова їх швидкості наближується до швидкості потоку повітря. Тут сепарація частинок визначається неперервною зміною вектора тангенціальної складової швидкості повітря і, внаслідок цього, наявністю радіальної складової швидкості частинки відносно середовища. За умови достатнього часу руху з потоку можуть виділитися частинки будь-якого розміру. Але в циклонах зі зворотним рухом потоку цьому перешкоджає радіальний сток, який захоплює дрібні частинки в напрямку висхідного потоку. Ті з частинок, для яких захоплююча сила стоку зрівнюється з силою інерції, рухаються на стаціонарних орбітах і постійно піддаються впливу турбулентних пульсацій потоку.

Вторинні токи також сильно впливають на ефективність циклону. Так, в циклоні що працює, біля входу у випускную трубу турбулізується шар повітря між зовнішнім і внутрішнім вихором і утворюється вторинний вихор. Цей вихор захоплює тонкодисперсний пил із зовнішнього вихору і виносить його у випускную трубу.

Багато українських й іноземних дослідників ведуть роботи вдосконалення конструкцій пиловловлюючих апаратів. Так у роботі [2] проведено дослідження по оцінці впливу введення в

малоефективний циклон додаткової «обвідної» труби, що з'єднує вхідний патрубок циклону і вихлопну трубу, встановлено механізми причин підвищення енергоефективності процесу очищення повітря від пилу, доведено, що зростання ступеня очищення пояснюється зниженням радіальної швидкості потоку під вихлопною трубою циклону. Недоліком даних апаратів, на думку авторів, може бути налипання пилу на обвідну трубу.

У дослідженні [3] авторами проаналізовано нову конструкцію відцентрового фільтра, створено математичну модель для визначення ефективності вловлювання твердих частинок; обґрунтовано та чисельно розраховано можливість очищення димових газів від твердих частинок у дослідженому апараті. Однак в роботі не обґрунтовано, як вибирати ширину кільцевих щілини, необхідну кількість каналів, ширину рециркуляційної щілини тощо.

У роботі [4] авторами досліджено нову конструкцію багатоканального дворівневого циклону, визначено швидкості руху повітря у каналах залежно від розташування кілець в апараті.

Абсолютні розміри циклону, незалежно від його конструктивних особливостей, суттєво впливають на його енергетичні параметри. Так, у роботі [5] проаналізовано залежність гідравлічного опору циклона ЦН-15 від висоти циліндричної частини, глибини занурення вихлопної труби, висоти конічної частини, діаметру вихлопної труби, діаметру пиловипускного патрубка. Крім того, в даній роботі досліджено поле швидкостей запиленого потоку всередині пиловловлювача, зокрема, її тангенціальна та осьова складові. До недоліку роботи можна віднести те, що в ній не вивчено вплив геометричних розмірів елементів апарату на ефективність його роботи.

У роботі [6] авторами досліджено високоефективні пиловловлювачі для сухого очищення газів – вихрові камери. Але таке обладнання має високий гідравлічний опір, складну конструкцію апарату і є дорогим в експлуатації.

Авторами [7] розроблено циклон вихрової дії, що дозволяє реалізувати відцентровий і вихровий механізми уловлювання пилу. Недоліком такого апарату є наявність мокрої ступені очищення, що вимагає додаткового обладнання для очищення шламу.

В роботі [8] розглянуто аеродинамічний механізм утворення вихрових течій у сепараційній камері, розподілу полів швидкості та тисків, запропоновано математичну модель процесу циклонування.

Отже, провівши аналіз робіт, що присвячені покращенню роботи пиловловлюючих апаратів, можна зробити висновок, що ефективність роботи циклонів значною мірою залежить від аеродинаміки газового потоку. Зі збільшенням тангенціальної швидкості руху газового потоку в циклоні, зростають сили, які заставляють частинки рухатися у

радіальному напрямку. Відповідно, зменшується час, протягом якого частинки досягають стінки циліндричної частини апарату і вловлюються. Дія цього фактору значною мірою визначає ефективність очищення у циклоні. Наявність радіальної та осьової складових швидкості також має вплив на сепарацію частинок пилу.

Тому, знання структури газового потоку, зокрема розподілу тангенціальної, радіальної та осьової складової швидкості по радіусу апарату, дасть можливість оцінити ефективність його роботи та ефективність змін в його конструкції.

### Мета роботи

Метою дослідження є аналіз структури газового потоку циклону з проміжним відведенням осадженого пилу. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести дослідження структури газового потоку циклону з проміжним відведенням осадженого пилу;
- по отриманих теоретичних розрахунках параметрів газового потоку оцінити ефективність використання пилорозвантажувальних отворів.

### Виклад основного матеріалу

Дослідження проводили методами чисельного моделювання та симуляції процесу сепарації, які значно пришвидшують процес досліджень і є набагато дешевшими.

Зараз гідродинамічне моделювання газових потоків в апаратах різних конструкцій на основі CFD-моделювання широко вивчено [9,10]. Даний метод широко застосовується, наприклад, для оптимізації центральної випускної труби у великих циклонних сепараторах для цементного виробництва [11], досліджень характеристик великого промислового циклону Stairmand [12], досліджень структури газового потоку в залежності від конструкції вхідного і вихідного патрубків [13], оптимізації геометрії циклонів першої стадії, що використовуються в технологічній лінії випалу клінкеру цементного виробництва [14], дослідження гідродинамічних режимів роботи циклону для вловлення пилу поліетилену низького тиску [15], дослідження впливу високої запиленості газового потоку при температурах навколишнього середовища і підвищених температурах на роботу циклонних сепараторів [16].

Для CFD-моделювання циклону з проміжним відведенням пилу, конструкція якого представлена в [17], була побудована геометрична 3D-модель. Потім за допомогою генератора сіток була створена обчислювальна сітка для цієї моделі. Всі геометричні перетворення були виконані в CAD програмі, а сітка створена у CFD програмі. Аеродинамічні дослідження даного апарату проводили по методиці згідно [18].

Для досліджень використовували стандартну модель k-ε, яка є однією з найбільш широко використовуваних моделей турбулентності завдяки своїй простоті в моделюванні структури турбулентних потоків. Вона не потребує великих обчислювальних потужностей у порівнянні з іншими k-ε турбулентними моделями.

Вихідними параметрами для дослідження даного циклону були: потік газу через апарат – повітря; атмосферний тиск за нормальних умов  $P_0=101325$  Па; температура середовища за нормальних умов  $T_0=293$  К; густина газу (повітря)  $\rho_{пов} = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>.

Для розрахунку задавали наступні граничні умови: відкритий потік – об'ємні витрати на виході (витрати відповідали фіктивній швидкості повітря 3,5 м/с); відкритий тиск – тиск навколишнього середовища; стіна – реальна стінка.

Необхідно зазначити, що дослідження за допомогою CFD – програм проводились для випадку коли циклон працює на лінії всмоктування.

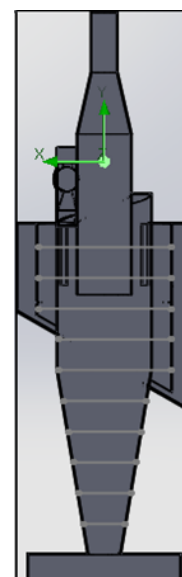


Рис. 1 – Розташування поперечних перерізів апарату в яких проводились дослідження

Основними параметрами, які аналізували в даній роботі були зміна по радіусу апарату тангенціальної, радіальної та осьової складової швидкості в досліджуваному циклоні.

Складові швидкості досліджуваного циклону досліджували в горизонтальних площинах відносно осі апарату через кожні 100 мм по висоті (рис. 1). Нульовою точкою по висоті прийнято площину переходу циліндричної частини апарату в конічну. Додатні значення висот відповідають додатному напрямку осі Y (рис. 1). За результатами досліджень побудовано графіки залежності тангенціальної, радіальної та осьової складових швидкості потоку від радіуса апарату.

### Обговорення результатів

Проаналізуємо тангенціальну, радіальну та осьову складову швидкості для досліджуваного циклону. Для наочності результатів графіки швидкості поділені на дві частини – окремо для циліндричної (сепараційної) (рис. 2, рис. 4, рис.6) і конічної частини (рис. 3, рис. 5, рис. 7). Додатні та від'ємні значення складових швидкості визначені напрямками осей нульової точки 3D-моделі (рис. 1). Додатне значення тангенціальної складової швидкості відповідає додатному напрямку осі Z, осьової – Y, радіальної – X.

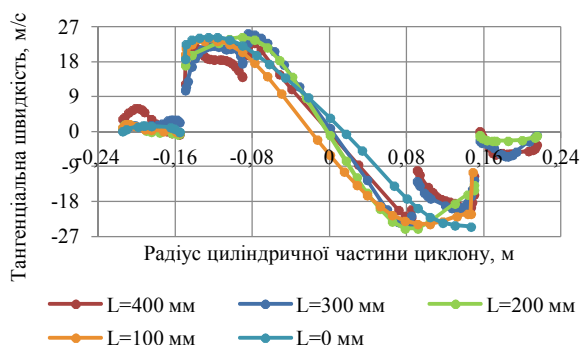


Рис. 2 – Залежність зміни тангенціальної складової швидкості по радіусу апарату в циліндричній частині апарату

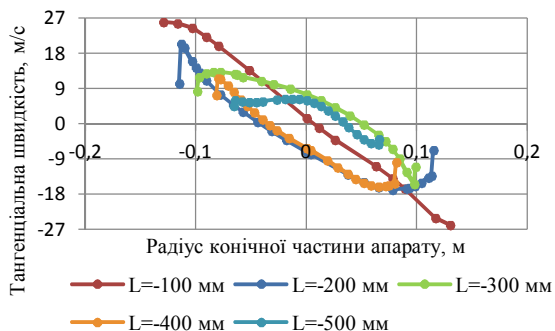


Рис. 3 – Залежність зміни тангенціальної складової швидкості по радіусу апарату в конічній частині апарату

Тангенціальна складова швидкості в сепараційному просторі збільшується від 18–20 м/с у верхній частині до 22–25 м/с у зоні нижнього торця випускної труби (рис. 2). За пилорозвантажувальними отворами тангенціальна складова абсолютної швидкості є в межах 1,5–6 м/с. Такі значення швидкості сприяють зменшенню турбулізації потоку і, відповідно, кращим умовам осадження частинок пилу за пилорозвантажувальними отворами.

Тангенціальна складова швидкості у верхніх площинах конічної частини апарату біля стінки

складає 27 м/с (рис. 3). Потім в міру руху газового потоку до пилорозвантажувального патрубку вона зменшується до 10 м/с. Це пов'язано з тим, що низхідний потік газу переходить у висхідний. Великі значення тангенціальної складової швидкості сприяють процесу сепарації частинок пилу у конічній частині апарату.

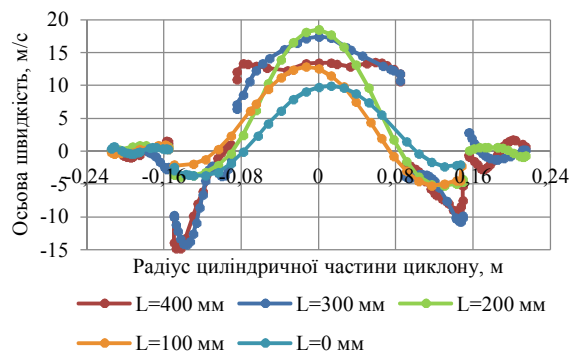


Рис. 4 – Залежність зміни осьової складової швидкості по радіусу апарату в циліндричній частині апарату

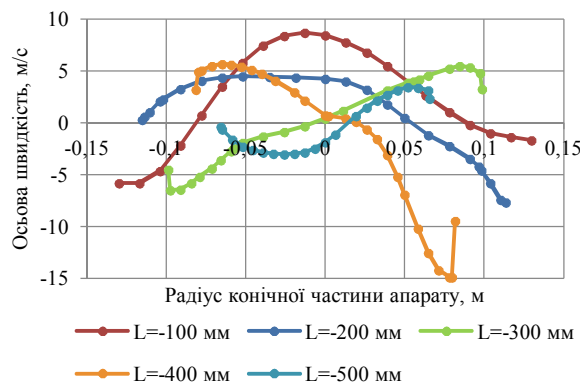


Рис. 5 – Залежність зміни осьової складової швидкості по радіусу апарату в конічній частині апарату

Найбільші значення осьова складова швидкості в кільцевому просторі між випускною трубою і циліндричною частиною апарату приймає на відстані 10–15 мм від стінки циліндричної частини апарату і складає 10–15 м/с (рис. 4). Нижче випускної труби осьова складова швидкості по радіусу змінює свій напрям. Розрахунки за результатами досліджень показують, що на відстані 50 мм нижче від нижнього торця випускної труби вторинним вихором з низхідного потоку у висхідний переноситься біля 60 % об'єму газу. Крім того, аналіз графіка залежності осьової складової абсолютної швидкості від радіуса показує, що у верхній частині апарату, біля стінки випускної труби утворюються зворотні токи, тобто

газовий потік змінює свій напрям щодо основного потоку.

В кінчній частині апарату осьова складова швидкості в міру руху газового потоку до пилорозвантажувального патрубку зменшується. Аналіз результатів досліджень показує, що в кінчній частині відбувається перехід біля 40 % об'єму газу з низхідного потоку у висхідний.

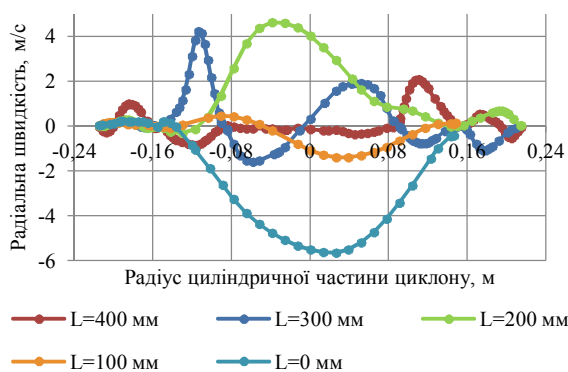


Рис. 6 – Залежність зміни радіальної складової швидкості по радіусу апарату в циліндричній частині апарату

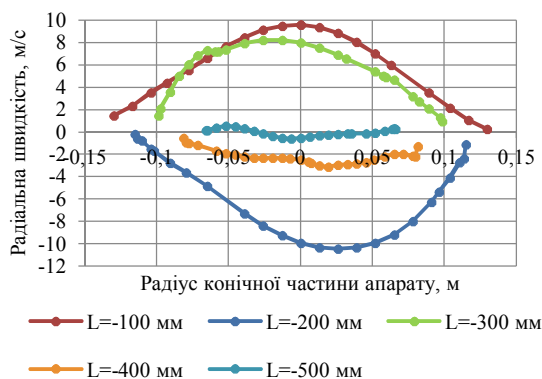


Рис. 7 – Залежність зміни радіальної складової швидкості по радіусу апарату в кінчній частині апарату

Практично у всьому сепараційному просторі радіальна складова швидкості є незначною. У верхній частині циліндричного корпусу вона приймає значення в межах від 0 до 2 м/с (рис. 6). Однак в перерізі, що збігається із нижнім торцем циліндричної частини апарату, радіальна швидкість в зоні центральної труби приймає значення 5–5,5 м/с. В міру збільшення радіусу вона зменшується до значень, які є в сепараційній зоні. Такий характер радіальної швидкості в зоні центральної труби позитивно впливає на процес вловлювання пилу в апараті.

Нижче нижнього торця центральної труби, тобто у кінчній частині апарату, радіальна швидкість отримує від'ємні значення. Це пов'язано з тим, що у

кінчній частині корпусу низхідний потік перетікає у висхідний.

## Висновки

Отже, провівши аналіз руху газового потоку в циклоні з проміжним відведенням пилу, можна зробити висновок, що великі значення тангенціальної складової швидкості (18–25 м/с) в сепараційній зоні сприяють попаданню частинок пилу у кільцевий простір за пилорозвантажувальними отворами, а невеликі значення тангенціальної складової швидкості (1,5–6 м/с), осьової (0–3 м/с) і радіальної (0–1 м/с) у кільцевому просторі за пилорозвантажувальними отворами сприяють осадженню частинок пилу, які попали в цей простір. Таким чином наявність пилорозвантажувальних отворів покращує ефективність роботи циклону.

## Список літератури

1. Пирумов А. И. *Аэродинамические основы инерционной сепарации*. Москва: Госстройиздат, 1961. 121 с.
2. Ryzhov V., Pryiomov S., Tymoshenko A. Improving the energy efficiency of cyclone dust collectors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 1/10 (103). P. 53–62. doi: 10.15587/1729-4061.2020.197083.
3. Boyko T., Skladanyy D., Abramova A., Plashyikliin S., Senienuk N. Analysis of the efficiency of purification of gas flows in a centrifugal filter *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 2/10 (80). P. 4–9. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65057.
4. Baliukas E., Baltrėnas P. Experimental research on the distribution of air stream velocity using the two-level cyclone. *Mokslas – Lietuvos Ateitis / Science – Future of Lithuania*. 2013. № 5(4). P. 330–336. doi:10.3846/mla.2013.53.
5. Ляшеник А. В., Лютий Є. М., Тисовський Л. О., Дадак Ю. Р. Теорія і практика використання циклонів на деревообробних підприємствах. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29. № 10. С. 97–103.
6. Pitak I., Shaporev V., Pitak O., Briankin S., Vasilyev M. Generalization of the aerodynamic characteristics of the cyclone and vortex chambers during their functioning. *Аудит технологій та виробничі резерви*. 2017. № 2 (40). С. 26–34. doi:10.15587/2312-8372.2018.128043.
7. Torsky A., Volnenko A., Plyatsuk L., Hurets L., Zhumadullayev D., Abzhabparov A. Study of dust collection effectiveness in cyclonic-vortex action apparatus. *Аудит технологій та виробничі резерви*. 2021. №1 (3 (57), 21–25. Doi:10.15587/2706-5448.2021.225328.
8. Kovalev V., Klimenko I. Aerodynamic aspects of polluted air aspiration in industrial rooms using cyclones. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018. № 2(83). doi:10.20535/2521-1943.2018.83.126105.
9. Artyukhov A., Sklabinsriy V. *Chem Chem Technol*. 2015. Iss. 9. P. 175.
10. Sklabinsriy V., Liaposhchenko O., Logvyn A., Al-Rammahi M. *Chem Chem Technol*. 2014. Iss. 8. P. 479.
11. Cristea E., Conti P. CFD simulation of large dust collection cyclones positioned vertically in staggered downward cascade arrangement. *Paper presented at the American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering*

- Division (Publication) FEDSM*. 2013. № 1. doi: 10.1115/FEDSM2013-16245.
- Erol H. I., Turgut O., Unal R., Experimental and numerical study of Stairmand cyclone separators: a comparison of the results of small-scale and large-scale cyclones. *Heat Mass Transfer*. 2019. № 55. P. 2341–2354. Doi:10.1007/s00231-019-02589-y.
  - Misiulia D., Antonyuk S., Andersson A. G., Lundström T. S., High-efficiency industrial cyclone separator: A CFD study. *Powder Technology*. 2020. Vol. 364. P. 943–953. Doi:10.1016/j.powtec.2019.10.064.
  - Wasilewski M., Brar L. S. Optimization of the geometry of cyclone separators used in clinker burning process: A case study. *Powder Technology*. 2017. № 313. P. 293–302. doi:10.1016/j.powtec.2017.03.025.
  - Razavi Alavi S. A., Nemati Lay E., Alizadeh Makhmali, Z. S. A CFD study of industrial double-cyclone in HDPE drying process. *Emerging Science Journal*. 2018. № 2(1). P. 31–38. doi:10.28991/esj-2018-01125.
  - Nakhaei M., Lu B., Tian Y., Wang W., Dam-Johansen K., Wu H. CFD modeling of gas-solid cyclone separators at ambient and elevated temperatures. *Processes*. 2020. № 8(2). doi:10.3390/pr8020228.
  - Дубинін А. І., Майструк В. В., Циклон з проміжним відведенням осадженого пилу. *Хімічна промисловість України*. 1999. № 2. С. 40–43.
  - Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. *SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике*. СПб: БХВ-Петербург. 2005. 800 с.
  - bulletin of NLTU of Ukraine*, 2019, Vol. 29, no. 10, pp. 97–103.
  - Pitak I., Shaporev V., Pitak O., Briankin S., Vasilyev M. Generalization of the aerodynamic characteristics of the cyclone and vortex chambers during their functioning. *Audyt tekhnolohiy ta vyrobnychi rezervy*, 2017, no. 2 (40), pp. 26–34, doi: 10.15587/2312-8372.2018.128043.
  - Torsky A., Volnenko A., Plyatsuk L., Hurets L., Zhumadullayev D., Abzhabparov A. Study of dust collection effectiveness in cyclonic-vortex action apparatus. *Audyt tekhnolohiy ta vyrobnychi rezervy*, 2021, no. 1(57), pp. 21–25, doi: 10.15587/2706-5448.2021.225328.
  - Kovalev V., Klimenko I., Aerodynamic aspects of polluted air aspiration in industrial rooms using cyclones. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2018, no. 2(83), doi: 10.20535/2521-1943.2018.83.126105.
  - Artyukhov A., Sklabinsriy V. *Chem Chem Technol.*, 2015, Iss. 9, p. 175.
  - Sklabinsriy V., Liaposhchenko O., Logvyn A., Al-Rammahi M. *Chem Chem Technol.*, 2014, Iss. 8, p. 479.
  - Cristea, E., Conti, P. CFD simulation of large dust collection cyclones positioned vertically in staggered downward cascade arrangement. *Paper presented at the American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM*, 2013, no. 1, doi: 10.1115/FEDSM2013-16245.
  - Erol H. I., Turgut O., Unal R., Experimental and numerical study of Stairmand cyclone separators: a comparison of the results of small-scale and large-scale cyclones. *Heat Mass Transfer*, 2019, no. 55, pp. 2341–2354, doi: 10.1007/s00231-019-02589-y.
  - Misiulia D., Antonyuk S., Andersson A. G., Lundström T. S., High-efficiency industrial cyclone separator: A CFD study. *Powder Technology*, 2020, Vol. 364, pp. 943–953, doi: 10.1016/j.powtec.2019.10.064.
  - Wasilewski M., Brar L. S. Optimization of the geometry of cyclone separators used in clinker burning process: A case study. *Powder Technology*, 2017, no. 313, pp. 293–302, doi:10.1016/j.powtec.2017.03.025.
  - Razavi Alavi S. A., Nemati Lay E., Alizadeh Makhmali, Z. S. A CFD study of industrial double-cyclone in HDPE drying process. *Emerging Science Journal*, 2018, no. 2(1), pp. 31–38, doi: 10.28991/esj-2018-01125.
  - Nakhaei M., Lu B., Tian Y., Wang W., Dam-Johansen K., Wu H. CFD modeling of gas-solid cyclone separators at ambient and elevated temperatures. *Processes*, 2020, no. 8(2), doi: 10.3390/pr8020228.
  - Dubynin A. I., Maystruk V. V. Tsyklon z promizhnym vidvedennyam osadzenoho pyly [Cyclone with intermediate removal of precipitated dust]. *Chemical industry of Ukraine*, 1999, no. 2, pp. 40–43.
  - Alyamovskiy A. A., sobachkinoy A. A., Odintsov Ye. V., Kharitonovich A. I., Ponomarev N. B. *SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике*. СПб.: БКНВ-Петербург. 2005, 800 p.

#### References (transliterated)

#### Відомості про автора (About author)

**Майструк Володимир Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри проектування та експлуатації машин; м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0001-6982-8592; e-mail: vmaistruk@gmail.com.

**Maistruk Volodymyr** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Designing and Operation of Machines, National University Lviv Polytechnic, Lviv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6982-8592; e-mail: vmaistruk@gmail.com.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

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:10.20998/2413-4295.2021.03.07.

*Please cite this article as:*

Maistruk V. Study of the structure of gas flow in a cyclone with intermediate dust removal. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 3 (9), pp. 48-54, doi:10.20998/2413-4295.2021.03.07.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Майструк В. В. Исследование структуры газового потока в циклоне с промежуточным отводом пыли. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 3 (9). С. 48-54. doi:10.20998/2413-4295.2021.03.07.

**АННОТАЦИЯ** Проведен анализ работ, в которых исследуются конструкции пылеулавливающих аппаратов, часто используемых в промышленности. Показано, что эффективность работы пылеуловителей в значительной степени зависит от структуры газового потока в аппарате. На основе проведенного анализа работы существующих циклонных аппаратов, получено картину процесса сепарации и определены факторы, которые негативно влияют на работу пылеулавливающих аппаратов. Установлено, что прогнозирование работы пылеулавливающих аппаратов в определенных условиях, эффективно проводить методами численного моделирования и симуляции процесса сепарации, которые широко используются для исследований аппаратов данного типа. С помощью методов численного моделирования проведено исследование циклона с промежуточным отводом пыли. В данном циклоне исследовано изменение по радиусу аппарата тангенциальной, радиальной и осевой составляющей скорости. В процессе исследований установлено, что в сепарационном пространстве тангенциальная составляющая скорости увеличивается от 18–20 м/с у верхней части аппарата до 22–25 м/с в зоне нижнего торца выпускной трубы, радиальная составляющая скорости принимает значения в пределах от 0 до 2 м/с, а осевая составляющая скорости имеет максимальные значения 10–15 м/с. В конической части аппарата тангенциальная составляющая скорости уменьшается от 27 м/с у верхних плоскостях конической части аппарата до 10 м/с возле пылеразгрузочного патрубка, радиальная составляющая скорости имеет центростремительный характер, осевая составляющая скорости по мере движения газового потока к пылеразгрузочному патрубку уменьшается. Установлено, что в цилиндрической части аппарата вторичным вихрем с нисходящего потока у восходящий переносится около 60% объема газового потока, а в конической части происходит переход около 40% объема газа с нисходящего потока в восходящий. Показано, что большие значения тангенциальной составляющей скорости в сепарационной зоне способствуют попаданию частиц пыли в кольцевое пространство за пылеразгрузочными отверстиями, а небольшие значения тангенциальной составляющей скорости, осевой и радиальной в кольцевом пространстве за пылеразгрузочными отверстиями способствуют осаждению частиц пыли, которая попала в это пространство, что положительно влияет на работу пылеулавливающего аппарата.

**Ключевые слова:** циклон с промежуточным отводом пыли; CFD-моделирование; степень очистки; гидравлическое сопротивление; энергоэффективность; тангенциальная, радиальная, осевая составляющая скорости.

*Надійшла (received) 28.08.2021*