

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЦИКЛОНУ З ПРОМІЖНИМ ВІДВЕДЕННЯМ ОСАДЖЕНОГО ПИЛУ

©Майструк В.В., Дзіндзюра В.П., 2021

Мета. Поставлену проблему в науково – дослідній роботі можна вирішити за допомогою дослідження впливу співвідношення об’єму газу, що проходить через пилорозвантажувальні отвори до кількості газу, що проходить через тангенціальний вхідний патрубок на гідравлічний опір і ефективність очищення в циклоні з проміжним відведенням осадженого пилу. **Актуальність** роботи полягає в тому, що встановлення оптимального співвідношення між витратами повітря, що відсмоктується через пилорозвантажувальні отвори і загальними витратами повітря в циклоні з проміжним відведенням осадженого пилу дозволить отримати високу ефективність роботи апарату даного типу при зменшенні гідравлічного опору. **Методика** полягає в тому, що для визначення гідравлічного опору і ефективності очищення за допомогою CFD – програм у САД – програмі була побудована модель циклону з проміжним відведенням осадженого пилу, конструкція якого представлена в [5] по методиці згідно [6]. **Результати.** Встановлено оптимальне співвідношення між витратами повітря, що відсмоктується через пилорозвантажувальні отвори і загальними витратами повітря в циклоні з проміжним відведенням осадженого пилу для різних схем підключення апарату. **Наукова новизна.** Вперше за допомогою теоретичних досліджень встановлено оптимальне співвідношення між витратами повітря, що відсмоктується через пилорозвантажувальні отвори і загальними витратами повітря в циклоні з проміжним відведенням осадженого пилу. **Практична значущість.** Використання в циклоні з проміжним відведенням осадженого пилу оптимального співвідношення між витратами повітря, що відсмоктується через пилорозвантажувальні отвори і загальними витратами повітря дозволяє отримати високу ефективність очищення повітря від пилу при менших енергетичних витратах.

Ключові слова: циклон з проміжним відведенням осадженого пилу, гідравлічний опір, ефективність очищення, витрати повітря, сепарація пилу, пилорозвантажувальні отвори.

Вступ.

Основними пристроями для очищення газів від пилу є циклони, що володіють хорошою ефективністю очищення при низьких капітальних і експлуатаційних витратах. Також їх перевагою є компактність, простота конструкції. Основним недоліком циклонних апаратів є зростаюча залежність ступеня пиловловлювання і витрат енергії на прокачування запиленого потоку через пиловловлюючий пристрій. Зазначені значні енерговитрати на знепилювання ставлять завдання пошуку нових оригінальних конструкторських і технологічних рішень.

Однак на шляху створення більш досконалих циклонних пиловловлювачів є певні труднощі, викликані головним чином відсутністю точних методів прогнозування експлуатаційних показників майбутніх апаратів з урахуванням конкретних умов роботи. Чинні методики за загальним розрахунком циклонів мають вузьку сферу застосування і не дозволяють прогнозувати параметри циклонів довільної форми.

Для вирішення практичних завдань щодо вдосконалення циклонних пиловловлюючих пристроїв великого значення набувають теоретичні методи, використання яких, із застосуванням математичного моделювання, чисельних методів і засобів сучасної обчислювальної техніки, дозволяє швидко і з високим ступенем вірогідності визначати параметри досліджуваного процесу.

Аналіз літературних джерел за темою статті.

У вітчизняній і закордонній літературі приведена велика кількість досліджень по визначенню енергоефективності пиловловлюючих апаратів різних конструкцій. Так у роботі [1] чисельним моделюванням виконано дослідження традиційного циклонного пиловловлювача Lapple із

вставленими хрестоподібними металевими лопатями у центральній випускній трубі. Проаналізовано вплив вставлених лопатей на поле швидкостей у центральній випускній трубі. Встановлено, що падіння тиску у центральній випускній трубі загалом зменшується шляхом зменшення діаметра труби. Інтенсивність турбулентності у центральній випускній трубі та внутрішньому вихорі мало впливають на ефективність роботи апарату, а збільшення інтенсивності турбулентності у зовнішньому вихорі зменшує ефективність роботи.

В роботі [2] представлено як експериментальне, так і чисельне дослідження роботи циклону з циркуляційним апаратом киплячого шару. Визначено вплив вхідної концентрації пилу на гідравлічний опір апарату.

В роботі [3] за допомогою CFD досліджено вплив просвердлених отворів у центральній випускній трубі на ефективність роботи і гідравлічний опір апарату. Встановлено, що оптимальною кількістю отворів у центральній випускній трубі є 4.

Також за допомогою чисельного моделювання в роботі [4] досліджено вплив кута вигину вхідного патрубку на ефективність роботи та гідравлічного опору в протиточному циклоні. Визначено, що кут вигину незначно впливає на ефективність очищення, тоді як його вплив на гідравлічний опір є дуже значним.

Провівши аналіз літературних джерел по дослідженню сучасного пиловловлюючого обладнання, можна зробити наступні висновки:

- Циклоні пиловловлювачі широко застосовуються для вловлювання пилу у різних галузях промисловості;
- для оптимізації конструкції апаратів по енергоефективності в більшості випадків використовують чисельні методи дослідження;

Застосування обчислювальних технологій і пакетів програм, дозволяє розраховувати з прийнятною для практики точністю гідродинамічні характеристики на стадії розробки та проектування промислових пристроїв, в тому числі пиловловлюючих, дозволяючи уникнути необхідності дорогих натурних випробувань. Крім того, такий інноваційний підхід дозволяє не тільки по-новому підійти до розв'язання актуальної задачі оптимізації конструкції пилоочисного обладнання, але й значно скоротити час на визначення їх основних робочих характеристик.

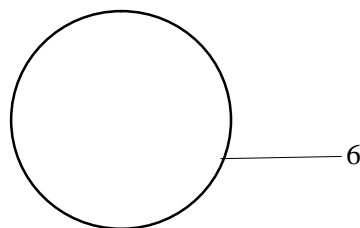


Рис. 1. Схема руху потоку у кільцевому просторі

1 - корпус; 2 – центральна випускна труба; 3 -пилорозвантажувальні отвори; 4 - патрубок для відсмоктування повітря, 5 – тангенціальний вхідний патрубок циклону; 6 - перегородка.

Fig. 1. Flow diagram of the flow in the annular space

1 - housing; 2 - the central exhaust pipe; 3 - dust unloading openings; 4 - a branch pipe for air suction, 5 - a cyclone inlet branch pipe; 6 – partition.

В роботі [5] було представлено конструкцію циклону з проміжним відведенням осажденного пилу (циклон з ПВП) в якому сепараційний циліндричний простір циклона через проміжний пилозбірник газоходом під'єднаний до трубопроводу очищеного повітря. В даному апараті запилений потік поступає з тангенціального патрубка у кільцевий простір і закручується. Повітря, що поступає на вхід циклона, далі рухається по шляхах найменшого опору, тобто частина його проходить, як у звичайних схемах, через циклон, а частина через допоміжний пилозбірник.

Зібраний у пиловий шнур пил рухається вздовж стінки циклону і попадає в зону пилорозвантажувальних отворів. Пил під дією відцентрової сили відхиляється, попадає у кільцевий простір між корпусом циклону і перегородкою (рис. 1), рухається вздовж стінки перегородки і осаджується в допоміжному пилосбірнику. При подальшому русі потоку у кільцевому просторі між центральною випускною трубою і корпусом циклону на частинки пилу, які не встигли відхилитись до стінки корпусу, діє відцентровий радіальний стік повітря в радіальному напрямку до цієї стінки, який утворюється шляхом відсмоктування повітря через пилорозвантажувальні отвори (рис. 1).

З метою збільшення ефективності пилоочищення в апараті можна під'єднати кільцевий простір за пилорозвантажувальними отворами до вихідного трубопроводу (за циклоном) (рис. 2.а) з метою створення повітряного потоку через дані отвори. Значного збільшення ефективності можна досягти, якщо повітря з пилосбірника відсмоктувати додатковим вентилятором і отриманий концентрований пиловий потік подавати на другу ступінь очищення, наприклад в додатковий пиловловлювач - така схема часто практикується в техніці пилоочищення (рис. 2.б).

a *б*

Рис. 2. Схеми під'єднання циклону: а - з відсмоктуванням за циклон; б - з подачею пилового потоку в додатковий пиловловлювач

Fig. 2. Cyclone connection schemes: a - with cyclone suction; b - with the supply of dust flow in an additional dust collector

Очевидно, що при збільшенні величини відсмоктаного повітря буде збільшуватись дія відцентрового радіального стоку, а відповідно і більша кількість пилу буде винесена через пилорозвантажувальні отвори за межі сепараційної зони циклону, збільшуючи ефективність очищення. Однак значне збільшення кількості відсмоктаного повітря приводить до зменшення кількості газу, що проходить через циліндрично-конічний сепараційний простір апарату, зменшення сили закручування потоку і, відповідно, відцентрової сили, яка діє на частинки пилу, що приводить до зменшення ефективності вловлювання пилових частинок в апараті. Отже, для ефективної роботи циклону з ПВП необхідно встановити оптимальне співвідношення між загальними витратами повітря і витратами повітря, що відсмоктується.

Мета.

Поставлену проблему в науково – дослідній роботі можна вирішити за допомогою дослідження впливу співвідношення об'єму газу, що проходить через пилорозвантажувальні отвори до кількості газу, що проходить через тангенціальний вхідний патрубок на гідравлічний опір і ефективність очищення в циклоні з проміжним відведенням осадженого пилу.

Методика проведення досліджень.

Для визначення гідравлічного опору і ефективності очищення за допомогою CFD – програм CAD – програмі була побудована модель циклону з ПВП, конструкція якого представлена в [5] по методиці згідно [6].

Вихідними параметрами для дослідження даних циклонів були характеристики пилоповітряного потоку: атмосферний тиск за нормальних умов $P_0=101325$ Па; температура середовища за нормальних умов $T_0=293$ К; густина повітря $\rho_{\text{пов}} = 1,293$ кг/м³; пил – пиловидний кварц, густина $\rho_{\text{пил}} = 2600$ кг/м³; фракційний склад пилу: 0 – 1 мкм – 5 %; 1 – 3 мкм – 14 %; 3 – 5 мкм – 16 %; 5 – 6 мкм – 5,5 %; 6 – 8 мкм – 9,5 %; 8 – 10 мкм – 8 %; 10 – 12 мкм – 4 %; понад 12 мкм – 38 %.

Фракційний склад пилу відповідав складу пилу № 3 з медіанним діаметром частинок 8 мкм, який отриманий з пиловидного кварцу КП – 3 і який використовується як стандартний для порівняльних випробувань пиловловлюючих апаратів інерційного типу [7].

Для розрахунку задавали наступні граничні умови: відкритий потік – об'ємні витрати на виході – 0,2826 м³/с (витрати відповідали фіктивній швидкості повітря 4 м/с); відкритий тиск – тиск навколишнього середовища; стіна – реальна стінка.

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

Під час досліджень апарату за схемою, яка представлена на рис. 1.а, витрата повітря, що проходить через тангенціальний вхідний патрубок і центральну випускную трубу була однаковою. Змінювали тільки кількість газу, що проходить через пилорозвантажувальні отвори. Під час дослідження гідравлічного опору та ефективності очищення досліджуваного циклону чисельними методами за схемою, яка представлена на рис. 1.б, об'єм газу, що проходить через центральну випускную трубу змінювали від 0,2261 до 0,2826 м³/с, а кількість газу, що проходить через пилорозвантажувальні отвори змінювали від 0 до 0,0565 м³/с. При цьому, загальний об'єм газу, що проходить через тангенціальний вхідний патрубок апарату залишався незмінним. Було проведено дослідження для п'ятих значень витрат газу через пилорозвантажувальні отвори: 0; 0,0141; 0,0283; 0,0424; 0,0565 м³/с, що складає відповідно 0%, 5%, 10%, 15%, 20% від загальних витрат повітря.

Результати досліджень та їх обговорення.

Дослідження по визначенню гідравлічного опору циклону з ПВП за допомогою CFD – програм окремо проводили для випадку подачі відсмоктаного повітря за циклон (схема на рис 1.а) і окремо для випадку подачі відсмоктаного повітря в додатковий пиловловлювач (схема на рис 1.б).

Рис. 3. Вплив величини відсмоктаного повітря на гідравлічний опір (Q_1 - витрати відсмоктаного повітря; Q_2 - загальні витрати повітря).

Fig.3. Influence of the amount of sucked air on the hydraulic resistance (Q_1 - suction air flow; Q_2 - total air flow).

Під час відсмоктування повітря через пилорозвантажувальні отвори гідравлічний опір ΔP , тобто різниця тисків на вході та виході апарату, зменшується. Якщо через пилорозвантажувальні отвори відсмоктується 20 % повітря від загального об'єму, то гідравлічний опір апарату зменшується в чотири рази (рис. 3) для випадку коли повітря подається в додатковий пиловловлювач. Для випадку коли відсмоктане повітря подається за циклон, гідравлічний опір зі збільшення витрат відсмоктування незначно збільшується.

Отримані результати досліджень гідравлічного опору дозволяють зробити наступний висновок, що відсмоктування повітря через пилорозвантажувальні отвори приводить до значного зменшення гідравлічного опору у випадку під'єднання циклону до додаткового пиловловлювача і незначного збільшення гідравлічного опору у випадку під'єднання додаткового пилозбірника до центральної випускної труби. Енергетичні витрати циклону з ПВП є меншими, ніж в стандартному ЦН-15, що приводить до висновку доцільності використання циклону даної конструкції з енергетичної точки зору.

Оптимальну величину відсмоктування можна визначити тільки під час дослідження ефективності очищення.

В роботі [8] приведені результати експериментальних досліджень, які показують, що ефективність циклону зростає до 83,4 % при оптимальних витратах відсмоктування $Q_1/Q_2=0,02$ для випадку коли відсмоктане повітря подається за циклон. У випадку під'єднання циклону до додаткового пиловловлювача експериментальні дослідження показують, що ефективність циклону зростає до 91,2 % при оптимальних витратах відсмоктування $Q_1/Q_2=0,07$.

Рис. 4. Залежність ефективності очищення від співвідношення між загальними витратами та витратами відсмоктаного повітря.

Fig. 4. Dependence of cleaning efficiency on the ratio between total costs and exhaust air costs.

Результати досліджень ефективності очищення чисельними методами приведені на рис. 4. Якщо додатковий пилозбірник під'єднаний до центральної випускної труби, то збільшення відносних витрат відсмоктування до $Q_1/Q_2=0,02$ збільшує ефективність очищення в циклоні до 86 %. Якщо $Q_1/Q_2 > 0,02$, ефективність зменшується. Це пояснюється тим, що внаслідок недосконалості конструкції проміжного пилозбірника все більша частина пилу з пилозбірника підхоплюється відсмоктуваним потоком і виноситься в очищене повітря.

У випадку під'єднання циклону до додаткового пиловловлювача зі збільшенням відносних витрат відсмоктування до $Q_1/Q_2=0,1..0,15$, ефективність очищення в циклоні з ПВП зростає і

досягає понад 89 %. Якщо $Q_1/Q_2 > 0,15$, ефективність зменшується. Як бачимо, отримані результати досліджень чисельними методами добре корелюються з експериментальними дослідженнями.

Висновки.

Аналізуючи отримані результати розрахунків чисельними методами та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

а) зі збільшенням величини відсмоктування повітря через пилорозвантажувальні отвори гідравлічний опір апарату зменшується для випадку подачі повітря у додатковий пиловловлювач;

б) зі збільшенням величини відсмоктування повітря через пилорозвантажувальні отвори гідравлічний опір апарату незначно збільшується для випадку подачі повітря за циклон;

в) оптимальною кількістю відсмоктаного повітря через пилорозвантажувальні отвори у випадку подачі повітря у додатковий пиловловлювач складає 10 – 15 % від загальної кількості газу, що поступає у вхідний тангенціальний патрубков;

г) оптимальною кількістю відсмоктаного повітря через пилорозвантажувальні отвори у випадку подачі повітря за циклон складає 2 % від загальної кількості газу, що проходить через апарат.

Список використаних джерел:

1. Binbin Pei, Liu Yang, Kejun Dong, Yunchao Jiang, Xusheng Du, Bo Wang, The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator, Powder Technology, Volume 313, 2017, Pages 135-144, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.066>.
2. Mathieu Morin, Ludovic Raynal, S.B. Reddy Karri, Ray Cocco, Effect of solid loading and inlet aspect ratio on cyclone efficiency and pressure drop: Experimental study and CFD simulations, Powder Technology, Volume 377, 2021, Pages 174-185, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.052>.
3. N. Prasanna, Karthikeyan Subramanian, S. Ajay, T. Rajagopal, V. Vigneshwaran, CFD study on the performance of reducing pressure drop holes in cyclone separator, Materials Today: Proceedings, Volume 43, Part 2, 2021, Pages 1960-1968, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.425>.
4. Marek Wasilewski, Lakhbir Singh Brar, Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators, Separation and Purification Technology, Volume 213, 2019, Pages 19-33, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.023>.
5. Дубинін А.І., Майструк В.В., Циклон з проміжним відведенням осадженого пилу. Хімічна промисловість України. 1999. № 2. с.40 – 43.
url: <https://scholar.google.com/scholar?cluster=13316094898130799495&hl=en&oi=scholar>
6. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Авторы: Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 1040 с.: ил. url: <https://ua1lib.org/book/756192/f21990?id=756192&secret=f21990>
7. Коузов П.А., Иофинов Г.А. Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей для очистки вентиляционного воздуха// - Л.: ВНИИОТ ВЦСПС, 1961, -103с. url: https://www.studmed.ru/kouzov-pa-ochistka-gazov-i-vozdusha-ot-pyli-v-himicheskoy-promyshlennosti_678548fcedd.html
8. Дубинін А.І., Майструк В.В. Аналіз процесу сепарації в циклоні з проміжним відведенням осадженого пилу. Вісник ДУ “ЛП” “Хімія, технологія речовин та їх застосування” 2002 р. №447, с.176-179. url: http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/39814/1/47_176-178.pdf

V. V.Maistruk, V. P. Dzinzura
Lviv Polytechnic National University

INVESTIGATION OF CYCLON OPERATION MODES WITH INTERMEDIATE REMOVAL OF DEPOSED DUST

©Maistruk V. V., Dzinzura V. P., 2021

Goal. The problem can be solved in research by studying the effect of the ratio of the volume of gas passing through the dust unloading holes to the amount of gas passing through the tangential inlet to the hydraulic resistance and cleaning efficiency in the cyclone with intermediate removal of precipitated dust. **Actuality** of the work is that the establishment of the optimal ratio between the flow of air sucked through the dust holes and the total air flow in the cyclone with intermediate removal of deposited dust will obtain the highest efficiency of this type of device while reducing hydraulic resistance. **The method** is that to determine the hydraulic resistance and cleaning efficiency using CFD - programs in the CAD - program was built a cyclone model with intermediate removal of deposited dust, the design of which is presented in [5] by the method according to [6]. **Results.** The optimal ratio between the flow of air sucked through the dust unloading holes and the total air flow in the cyclone with the intermediate removal of deposited dust for different connection schemes of the device. **Scientific novelty.** For the first time with the help of theoretical researches the optimum ratio between the expenses of the air sucked out through dust unloading openings and the general expenses of air in a cyclone with intermediate removal of the deposited dust is established. **Practical significance.** The use in a cyclone with intermediate removal of deposited dust, the optimal ratio between the flow of air sucked through the dust discharge holes and the total air flow allows to obtain higher efficiency of air purification from dust at lower energy costs.

Key words: cyclone with intermediate removal of deposited dust, hydraulic resistance, cleaning efficiency, air flow, dust separation, dust unloading holes.

References

1. Binbin Pei, Liu Yang, Kejun Dong, Yunchao Jiang, Xusheng Du, Bo Wang, The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator, Powder Technology, Volume 313, 2017, Pages 135-144, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.066>.
2. Mathieu Morin, Ludovic Raynal, S.B. Reddy Karri, Ray Cocco, Effect of solid loading and inlet aspect ratio on cyclone efficiency and pressure drop: Experimental study and CFD simulations, Powder Technology, Volume 377, 2021, Pages 174-185, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.052>.
3. N. Prasanna, Karthikeyan Subramanian, S. Ajay, T. Rajagopal, V. Vigneshwaran, CFD study on the performance of reducing pressure drop holes in cyclone separator, Materials Today: Proceedings, Volume 43, Part 2, 2021, Pages 1960-1968, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.425>.
4. Marek Wasilewski, Lakhbir Singh Brar, Effect of the inlet duct angle on the performance of cyclone separators, Separation and Purification Technology, Volume 213, 2019, Pages 19-33, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.023>.
5. Dubinín A.Í., Khanik YA.M., Maystruk V.V., Gavriliv R.Í Pryamotechiyniy tsiklon z koaksial'noyu vstavkoyu. Analiz roboti// KHimichna promislovist' Ukraïni, - 2005.-№3. - s.26 - 28.
6. SolidWorks. Komp'yuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike / Avtory: Alyamovskiy A. A., Sobachkin A. A., Odintsov Ye. V., Kharitonovich A. I., Ponomarev N. B. — SPb.: BKHV-Peterburg, 2008. — 1040 s.: il.
7. Kouzov P.A., Iofinov G.A. Yedinaya metodika sravnitel'nykh ispytaniy pyleuloviteley dlya ochistki ventilyatsionnogo vozdukh// - L.: VNIOT VTSSPS, 1961, -103s.
8. Dubynin A.I., Maystruk V.V. Analiz protsesu separatsiyi v tsykloni z promizhnym vidvedennyam osadzenoho pyly. Visnyk DU "LP" "Khimiya, tekhnolohiya rechovyn ta yikh zastosuvannya" 2002 r. №447, s.176-179.