

ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ЦИКЛОНІВ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ SOLID WORKS FLOW SIMULATION

Представлено результати використання програмного пакета Flow Simulation для попередньої оцінки гідравлічного опору циклонів різних конструкцій. Проаналізовано вплив конструктивних параметрів апаратів на енергетичні затрати при роботі циклонів. Представлені результати можуть бути використані в інженерній практиці під час проектування нового та модернізації наявного пилоочисного обладнання відцентрової очистки газів.

Ключові слова: гідравлічний опір циклону, поле швидкостей, програмний пакет Flow Simulation, теоретичний аналіз роботи циклона.

Вступ. Сучасні пилоочисні установки на базі протитечійних циклонів, які найчастіше використовуються в різних галузях промисловості, характеризуються достатньо високою ефективністю та значними енергетичними затратами на процес очищення. Розроблення нових конструкцій протитечійних циклонів, особливо для вловлювання дрібнодисперсної фракції пилу, неминуче пов'язано зі збільшенням гідравлічного опору таких апаратів.

Тенденції останніх років до зменшення енергетичних витрат на процеси пилоочистки проявляються у модернізації наявних протитечійних установок та впровадженні відцентрових апаратів з прямотечіюною зоною розділення, основною перевагою яких є можливість ефективного розділення у широкому діапазоні витрати газу та концентрації твердої фази при порівняно невисокому гідравлічному опорі.

Постановка проблеми, її актуальність. Однією з основних проблем під час проектування нових пилоочисних апаратів із відцентровою зоною розділення будь-якого типу та модернізації наявних установок є відсутність надійних методів прогнозування визначальних характеристик циклонів – ефективності вловлювання пилу та гідравлічного опору.

Розрахунок ефективності апарата проводять, переважно користуючись спрощеними математичними моделями, які в більшості випадків спотворюють реальну картину процесу сепарації, що відбувається в робочій зоні циклона, а це призводить до завищених результатів щодо вловлювання частинки пилу, особливо дрібних фракцій. Експериментальні дослідження із визначення поля швидкостей взагалі важко реалізувати внаслідок складності конструкції апаратів та відсутності надійних та доступних вимірювальних приладів і методик розрахунку.

Втрати тиску переважно визначають експериментальним шляхом у лабораторних умовах залежно від конструктивних особливостей апарата, фіктивної швидкості та технологічних параметрів.

Відсутність надійних способів прогнозування основних технологічних характеристик циклона створює значні труднощі під час розроблення нових та модернізації наявних конструкцій апаратів сухої очистки газів, а наявні лабораторні методи є трудомісткими та економічно недоцільними.

Тому задача з вдосконалення розрахунку аеродинамічних характеристик та процесу пиловловлювання в робочій зоні циклонів різних конструкцій з метою прогнозування їх основних робочих характеристик є актуальною.

Мета і завдання досліджень. За останні роки в техніці пилоочистки розроблено нові конструкції циклонів. На кафедрі хімічної інженерії НУ "Львівська політехніка" ведеться науково-дослідна робота з дослідження аеродинаміки та ефективності роботи циклонів різних конструкцій. Одним із технічних рішень із модернізації наявного протитечійного циклона ЦН-15 є циклон з проміжним відведенням пилу (ЦН-15 ПВП), розроблено також конструкцію прямотечіюного циклону з коаксіальною вставкою (ПЦЗКВ) [1, 2].

Поставлена проблема в науково-дослідній роботі часто вирішується засобами комп'ютерного моделювання руху газопилових потоків у робочій зоні циклона та вивченням роботи апарата.

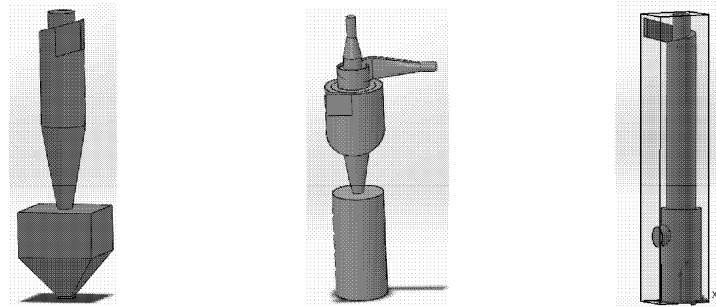
Суть цього методу полягає в тому, що на основі математичної моделі, яка закладена в програмний продукт, кількісно визначається поведінка об'єкта, що вивчається, в тих або інших умовах. Зіставлення результатів розрахунків з експериментальними дослідженнями дає змогу оцінити ефективність цієї математичної моделі. За адекватності моделі з'являється можливість знайти оптимальні геометричні параметри і режими роботи діючих або проєктованих конструкцій пиловловлюючих апаратів.

Серед найбільш відомих програмних комплексів можна виділити такі: SolidWorks фірми DSS SolidWorks Corp., Ansys фірми Ansys Inc., FlowVision фірми Tecnic й ін. У роботі [3] за допомогою ПК SolidWorks Flow Simulation було проаналізовано вплив режимних і конструктивних параметрів на гідравлічний опір прямотечіюного циклона та вибрано на основі одержаних результатів оптимальну геометрію апарата для промислового типу. Теоретичні експерименти, виконані за допомогою ПК SolidWorks Flow Simulation, добре узгоджуються з експериментальними даними.

З метою подальшого аналізу можливості використання даного ПК для визначення величини гідравлічного опору циклонів різних конструкцій було сформульовано такі завдання:

- створити тривимірні геометричні моделі досліджуваних апаратів: ЦН-15, ЦН-15 з ПВП, ПЦЗКВ;
- використовуючи ПК Solid Works Flow Simulation, теоретично дослідити траєкторію руху газової фази в робочій зоні циклона, вивчити вплив констукції апарата на гідравлічний опір циклона;
- перевірити одержані теоретичним шляхом дані з експериментально визначеними;
- на основі одержаних результатів розробити рекомендації щодо вдосконалення геометрії циклонів для зменшення енергетичних витрат під час їхньої роботи.

Результати досліджень. На рис. 1 представлено моделі досліджуваних циклонів, виконані засобами твердотільного моделювання в Solid Works. Геометричні розміри моделей апаратів (табл. 1) повністю відповідали реальним фізичним моделям, лабораторних установок, які змонтовані на експериментальному стенді з метою визначення величини гідравлічного опору.



а) Твердотіла модель циклона типу ЦН-15 б) Твердотіла модель циклону ЦН-15З ПВП в) Твердотіла модель прямоточного циклону з коаксальною вставкою

Рис. 1. Моделі досліджуваних циклонів, виконані засобами твердотілого моделювання в SOLID WORKS

Табл. 1. Конструктивні розміри досліджуваних циклонів

Параметр, мм	Тип циклону		
	ЦН-15	ЦН-15З ПВП	ПЦЗКВ
Діаметр циклона	400	300	310
Діаметр вихлопної труби	240	180	-
Діаметр центральної труби	-	-	-
Висота циліндричної частини	904	675	-
Висота конічної частини	800	600	-
Висота вихлопної труби	-	520 (425)	-
Висота робочої зони	-	-	980
Висота центральної труби, h	1024	-	530-1600
Розмір вхідного патрубку	264×104	200×60	175×60
Діаметр коаксальної вставки	-	-	286
Діаметр бункера	-	500	445
Висота бункера	800	995	995
Висота конічної частини бункера	380	-	-
Ширина бункера	690	-	-
Кількість пилорозвантажувальних отворів	-	6	-
Розміри пилорозвантажувальних отворів	-	200×40	-

Для створеної в системі автоматизованого проектування Solid Works твердотілової моделі циклона використовували програмний комплекс Flow Simulation. Дальше задавали математичну модель руху газового потоку.

Модель включала в себе: рівняння Нав'є-Стокса, яке описує в нестационарних умовах закон збереження маси, імпульсу й енергії рухомого середовища, рівняння нерозривності потоку, рівняння перенесення кінетичної енергії турбулентності і її дисипації в рамках k -е моделі турбулентності.

Для розв'язку задачі про рух повітряних потоків задавали початкові й граничні умови, які, своєю чергою, визначаються формою і конструктивними особливостями апарата та умовами його роботи:

- атмосферний тиск за нормальних умов $p_0 = 101325$ Па;
- температура повітря за нормальних умов $T_0 = 293$ К;
- густина повітря $\rho_n = 1,2$ кг/м³;
- рівність нулю швидкості на нерухомій твердій границі;

- фіктивна швидкість повітряного потоку в робочій зоні циклона 1-5 м/с.

Гідравлічний опір визначали як різницю тиску на вході і на виході з апарата. Приймали, що апарат працює під розрідженням, відповідно повний тиск на вході в апарат дорівнює атмосферному.

Одержані дані теоретично розрахованого гідравлічного опору засобами Solid Works Flow Simulation та визначеного на експериментальному стенді представлені у вигляді графічних залежностей $\Delta P = f(W_0)$ на рис. 2.

Результати представлені на рис. 2 свідчать про те, що із збільшенням фіктивної швидкості газового потоку збільшується гідравлічний опір циклона. Характер цієї залежності описується загальновідомим рівнянням:

$$\Delta P = \zeta_0 (\rho W_0^2 / 2),$$

де: W_0 – фіктивна швидкість газового потоку в робочій зоні апарата, ρ – густина газу, ζ_0 – коефіцієнт гідравлічного опору.

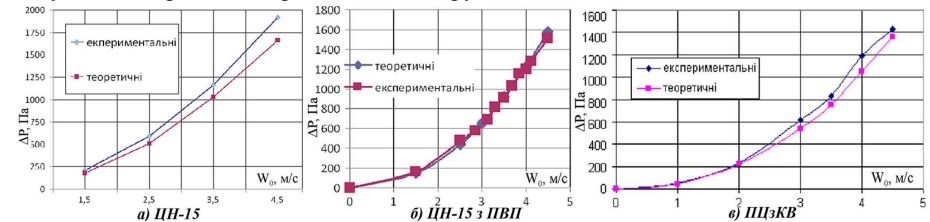


Рис. 2. Результати досліджень гідравлічного опору циклонів

У табл. 2 наведено порівняння експериментального $\zeta_0^{\text{експ}}$ та теоретичного $\zeta_0^{\text{теор}}$ коефіцієнтів гідравлічного опору, розрахованих згідно із цією залежністю. Відносну похибку φ визначеного коефіцієнта опору циклона визначали за формулою: $\varphi = |(\zeta_0^{\text{експ}} - \zeta_0^{\text{теор}}) / \zeta_0^{\text{експ}}|$

Табл. 2. Порівняння експериментальних і теоретичних значень ζ_0

Циклон	W_0 , м/с	$\zeta_0^{\text{експ}}$	$\zeta_0^{\text{теор}}$	φ , %
ЦН-15	1,5	146,63	125,11	14,67
	2,5	146,66	126,46	13,76
	3,5	146,64	129,93	11,40
	4,5	146,65	126,95	13,43
ЦН-15 з ПВП	1,5	113,43	104,49	7,88
	2,5	118,05	108,65	7,97
	3,5	114,78	116,04	1,10
	4,5	115,49	120,61	4,43
ПЦЗКВ	1,5	82,6	78,4	5
	2,5	97	89,13	8,11
	3,5	104,80	95,33	9,04
	4,5	109,23	103,88	4,90

З табл. 2 видно, що найбільші розбіжності розрахованих і експериментальних даних одержані для протитичіного циклона ЦН-15. Це можна пояснити більш складною аеродинамічною картиною у цьому апараті. На рис. 3 для порівняння побудовані траєкторії руху повітряних потоків з розподілом складових швидкості в горизонтальних перерізах. Аналіз представленої аеродинаміки

показує, що в робочій зоні в периферійній частині криволінійного потоку спостерігаємо збільшення тангенціальної швидкості по радіусу. За мірою руху потоку вздовж осі циклона внаслідок тертя газової фази об тверду стінку тангенціальна складова зменшується, відповідно зменшується відцентрова сила, але при цьому зростає осьова складова швидкості. Статичний тиск у циклоні знижується по радіусу до центра, циклону досягаючи мінімуму на осі (рис. 4).

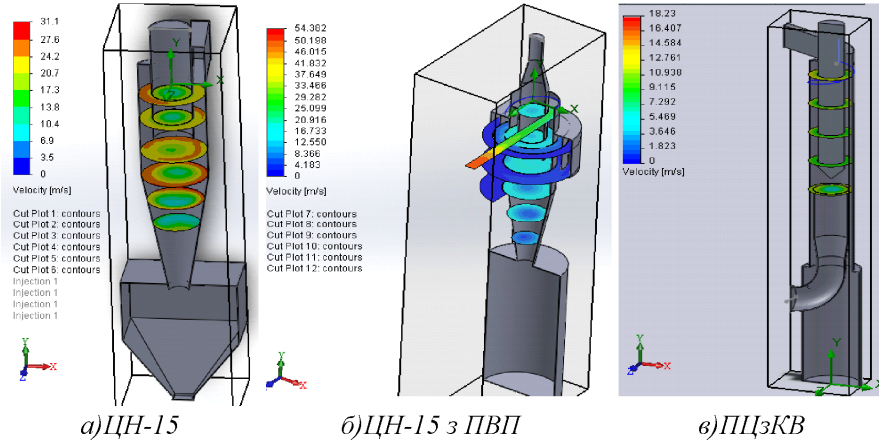


Рис. 3. Розподіл абсолютної швидкості в поперечних перерізах робочої зони циклона

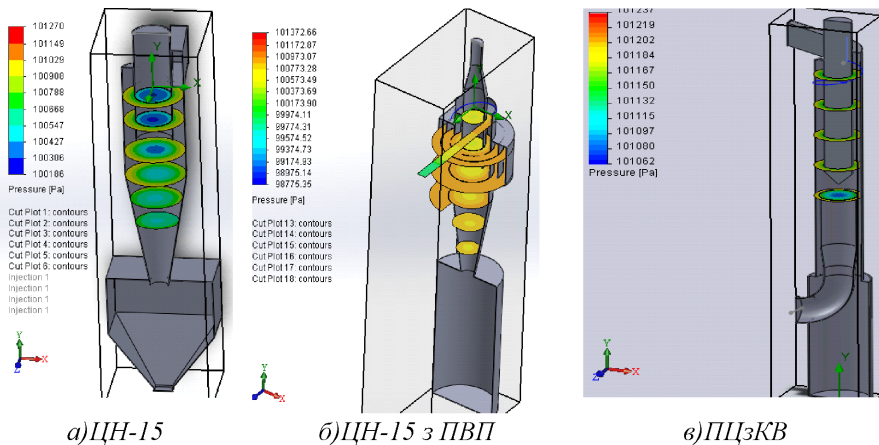


Рис. 4. Розподіл статичного тиску в поперечних перерізах робочої зони циклона

У нижніх шарах робочої камери рівновага між силами статичного тиску і відцентровою силою порушується, виникають радіальні течії, які напрямлені до осі, тобто підсилюються вторинні потоки і збільшується гідравлічний опір. Особливо це характерно для циклона з протитечією зоною розділення ЦН-15, в якого гідравлічний опір найвищий. У прямотечієвому циклоні радіальні течії практично відсутні, а також відсутній поворот очищеного газу у вихлопну трубу, тому втрати тиску в цьому апараті є найменші.

Проміжне відведення газового потоку в циклоні ЦН-15 з ПВП дає змогу дещо вирівняти статичний тиск у радіальному напрямку, що приводить до зменшення перетоку повітря в кільцевому просторі від стінки корпусу до верхньої вихлопної труби.

Висновки. Аналіз та узагальнення результатів теоретичних та лабораторних експериментів, які одержані для запропонованих конструкцій циклонів, дають змогу зробити такі висновки:

- результати експериментальних досліджень апаратів різних конструкцій добре узгоджуються із теоретично розрахованими в Flow Simulation. Похибка визначення коефіцієнта гідравлічного опору у всіх випадках не перевищує допустимих меж і цю методику можна застосувати в інженерних розрахунках;
- експериментальні й теоретичні дослідження показують зменшення гідравлічного опору прямотечієвого циклона з коксальною вставкою і циклона з ПВП, порівняно з циклоном ЦН-15, що є важливим для зменшення енергетичних затрат;
- аналіз траєкторії руху закрученого газового потоку в апараті дає змогу розробити практичні рекомендації під час створення нових та модернізації наявних пилоочисних апаратів;
- значно скорочується час та затрати на розробку, проектування та експериментальні дослідження циклонів.

Література

1. Дубинін А.І. Циклон з проміжним відведенням осадженого пилу / А.І. Дубинін, В.В. Майстрок // Хімічна промисловість України : наук.-виробн. журнал, 1999. – № 2. – С. 40-43.
2. Дубинін А.І. Прямотечієвий циклон з коксальною вставкою. Аналіз роботи / А.І. Дубинін, Я.М. Ханік, В.В. Майстрок, Р.І. Гаврилів // Хімічна промисловість України : наук.-виробн. журнал, 2005. – № 3. – С. 26-28.
3. Майстрок В.В. Оцінка енергозатрат при роботі прямотечієвого циклону за допомогою програмного пакету FLOW SIMULATION / В.В. Майстрок, Р.І. Гаврилів, А.С. Попіль, А.М. Басістий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків. – 2012. – Вип. 6/8(60). – С. 28-30.

Гаврилів Р.І., Майстрок В.В., Тумура О.О., Кухар О.М. Определение гидравлического сопротивления циклонов средствами компьютерного моделирования SOLID WORKS FLOW SIMULATION

Представлены результаты использования программного пакета Flow Simulation для предварительной оценки гидравлического сопротивления циклонов различных конструкций. Проанализировано влияние конструкционных параметров аппаратов на энергетические затраты при работе циклонов. Представленные результаты могут быть использованы в инженерной практике при проектировании новых и модернизации старых конструкций оборудования центробежной очистки газов.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление циклона, поле скоростей, программный пакет Flow Simulation, теоретический анализ работы циклона.

Havrilliv R.I., Maistryk V.V., Tummyra O.O., Kykhar O.M. Determination of hydraulic resistance means cyclone computer modelling SOLID WORKS FLOW SIMULATION

In this paper presents the results of using the software package Flow Simulation to estimate hydraulic resistance cyclones of various designs. The influence of design parameters on the energy consumption of devices when using cyclones. The results can be used in engineering practice in the design of new and modernization of existing equipment for gas separation.

Keywords: hydraulic resistance cyclone, velocity field, software package Flow Simulation, theoretical analysis of cyclone work.