

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Хіміко-технологічний факультет

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри
_____ Т.В.Бойко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ___ ” червня 2015 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 8.05020202 - Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і
виробництва

на тему: **«Моделювання процесу очистки газових потоків в циклонному
пиловловлювачі»**

Виконав: студент VI курсу, групи ХА-31м
(шифр групи)

_____ Набок Олександр Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник доцент каф. КХТП, к.т.н.,

_____ доцент Безносик Ю.О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях _____
(назва розділу)

к.т.н., доцент Полукаров Ю.О.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

_____ (посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2015 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»**

Факультет хіміко-технологічний.

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів.

Рівень вищої освіти - другий (магістерський)

Спеціальність 8.05020202 - Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

Т.В.Бойко
(підпис)

« 2 » вересня 2013 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Набок Олександр Миколайович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Моделювання процесу очистки газових потоків в циклонному пиловловлювачі»

науковий керівник дисертації Безносик Юрій Олександрович,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

к.т.н., доцент

затверджені наказом по університету від « 09 » квітня 2015 р. № 858-с

2. Строк подання студентом дисертації 16 червня 2015 р.

3. Об'єкт дослідження комп'ютерне моделювання процесу очищення газових потоків в циклонному пиловловлювачі

4. Предмет дослідження автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології процесу очищення газових потоків в циклонному пиловловлювачі

5. Перелік завдань, які потрібно розробити математична модель, яка дозволяє адекватно описати вплив технологічних і конструктивних параметрів на ступінь очистки і гідравлічний опір циклонного пиловловлювача, розробка методики та алгоритму розрахунку промислового зразка циклофільтра, оцінка умов охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу електронна презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій чотири тези та дві статті на всеукраїнських та міжнародних коференціях

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Полукаров Юрій Олексійович, доцент кафедри охорони праці промислової та цивільної безпеки		

9. Дата видачі завдання 2 вересня 2013р

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розробка календарного плану	10.09.13	
2	Робота з літературними джерелами	02.02.14	
3	Огляд конструкційного оформлення циклонного пиловловлювача	21.04.14	
4	Формулювання фізичної моделі процесу пиловловлювання	26.06.14	
5	Розроблення математичної моделі та її дослідження	15.10.14	
6	Розробка методики та алгоритму розрахунку промислового зразка	27.11.14	
7	Оцінка умов охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	28.01.15	
8	Підготовка статей доповідей	23.02.15	
9	Підготовка тез доповідей	01.04.15	
10	Оформлення магістерської дисертації	01.06.15	
11	Підготовка доповіді та презентації	13.06.15	
12	Попередній захист	16.06.15	

Студент

(підпис)

Набок О.М.

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Ю.О. Безносик

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 146 сторінок, рисунків 60, таблиць 14, 2 додатки, 52 джерел.

Метою дисертаційної роботи є розробка математичної моделі, яка дозволяє адекватно описати вплив технологічних і конструктивних параметрів на ступінь очистки і гідравлічний опір циклонного пиловловлювача

Об'єкт дослідження - комп'ютерне моделювання процесу очищення газових потоків в циклонному пиловловлювачі

Предмет дослідження – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології процесу очищення газових потоків в циклонному пиловловлювачі

Методи дослідження - математичне моделювання процесу очищення газових викидів в циклонному пиловловлювачі.

Сформульовано фізичну модель процесу пиловловлювання в циклонному пиловловлювачі.

Розроблено математичну модель, яка дозволяє адекватно описати вплив технологічних і конструктивних параметрів на ступінь очистки і гідравлічний опір циклонного пиловловлювача.

Отримано аналітичні залежності для розрахунку гідравлічного опору створеного пиловловлювача від його продуктивності, визначено коефіцієнт втрат тиску в апараті.

Отримано аналітичні залежності для розрахунку ефективності пиловловлювання в створеному апараті за математичною моделлю процесу сепарації в ньому.

За результатами досліджень розроблено методику та алгоритм розрахунку промислового зразка циклофільтра для очистки запиленого потоку

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ, СЕПАРЦІЯ.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка 146 страниц, рисунков 60, таблиц 14,
2 приложения, 52 источников.

Целью исследования является разработка математической модели, которая позволяет адекватно описать влияние технологических и конструктивных параметров на степень очистки и гидравлическое сопротивление циклонного пылеуловителя.

Объект исследования - компьютерное моделирование процесса очистки газовых потоков в циклонном пылеуловителе.

Предмет исследования - автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии процесса очистки газовых потоков в циклонном пылеуловителе.

Методы исследования - математическое моделирование процесса очистки газовых выбросов в циклонном пылеуловителе.

Сформулировано физическую модель процесса пылеулавливания в циклонном пылеуловителе.

Разработана математическая модель, которая позволяет адекватно описать влияние технологических и конструктивных параметров на степень очистки и гидравлическое сопротивление циклонного пылеуловителя.

Получены аналитические зависимости для расчета гидравлического сопротивления созданного пылеуловителя от его производительности, определен коэффициент потерь давления в аппарате.

Получены аналитические зависимости для расчета эффективности пылеулавливания в созданном аппарате по математической модели процесса сепарации в нем.

По результатам исследований разработана методика и алгоритм расчета промышленного образца циклофильтра для очистки запыленного потока

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ, ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ, СЕПАРАЦИЯ.

ABSTRACT

Explanatory note 146 pages, drawings 60, tables 14, 2 addition, 52 sources.

The aim of dissertation work is development of mathematical model, that allows adequately to describe influence of technological and structural parameters on the degree of cleaning and hydraulic resistance of cyclone dust collector.

Object of study - the purification process computer modeling gas flows in cyclone dust collectors.

Subject of investigation - automation and computer integrated technologies of the process of cleaning gas flows in cyclone dust collectors.

Research methods - mathematical modeling process of purification of gas emissions in the cyclone dust collectors.

Physical model is formulated for dust collection process in cyclonic dust collectors.

The mathematical model was develop, that can adequately describe the impact of technological and structural parameters on the degree of treatment resistance and hydraulic cyclone dust collector.

Analytical dependences was obtained for calculation of hydraulic resistance created from the dust collector productivity, defined pressure loss coefficient in the machine.

Analytical dependences was obtained for calculation of efficiency dust collection unit created by a mathematical model of the process of separation there.

According to the research methodology and algorithm of the industrial design cyclone filter for cleaning dusty flow.

MATHEMATICAL MODELING, MATHEMATICAL MODELS, DUST REMOVAL, SEPARATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	11
ВСТУП	12
1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ	
ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ.....	14
1.1 Промислова та санітарна очистка газів	14
1.2 Очистка газів в циклонах	19
1.3 Розрахунок ефективності та енерговитрат в циклонах.....	34
1.4 Постановка задачі магістерської дисертаційної роботи	39
1.5 Висновки до розділу	40
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ	
ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЗІВ В ЦИКЛОННОМУ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ	
41	
2.1 Фізична модель процесу очищення димових та технологічних газів в циклонному пиловловлювачі	41
2.2 Математична модель аеродинамічного опору циклонного пиловловлювача	43
2.3 Розрахунок ефективності вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі	58
2.4 Алгоритм розрахунку циклонного пиловловлювача	63
2.5 Результати розрахунків за математичною моделлю	65
2.6 Висновки до розділу	68
3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ.....	
69	
3.1 Моделювання аеродинамічних процесів пиловловлювачів	70

3.2 Дослідження характеру руху твердих частинок різного медіанного діаметру в запиленому потоці.....	92
3.3 Перевірка адекватності розробленої математичної моделі	100
3.4 Висновки до розділу	104
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	106
4.1 Охорона праці.....	106
4.1.1 Виявлення та аналіз ШНВФ на проектному об'єкті (в умовах виконання експериментальної частини науково дослідної роботи).....	106
4.1.1.1 Повітря робочої зони.....	106
4.1.1.2 Виробниче освітлення	109
4.1.1.3 Захист від виробничого шуму і вібрації.....	110
4.1.1.4 Електромагнітні поля	111
4.1.1.5 Іонізуючі випромінювання	111
4.1.1.6 Електробезпека	112
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях	114
4.2.1 Атестація робочого місця	114
4.2.2 Пожежна безпека	115
4.2.3 Безпека технологічних обладнання	118
4.2.4 Аналіз небезпеки об'єкта.....	118
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	120
ДОДАТОК А.....	ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.
ДОДАТОК Б	136

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

- τ - час, с;
- D - діаметр апарата, м;
- Q - витрати повітря, м³/год;
- m - маса пилу, кг;
- μ - коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, Па•с;
- v - приведена швидкість в перерізі апарата, м/с;
- A, B, K, k - розрахункові коефіцієнти;
- Δp - аеродинамічний опір апарата, Па;
- Re - число Рейнольдса;
- λ - коефіцієнт гідравлічного тертя;
- ξ - коефіцієнт повного аеродинамічного опору;
- η - ефективність вловлювання твердих часток, %;
- δ - медіанний діаметр часток пилу, мкм;
- c - концентрація пилу в потоці, г/м³;
- ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, м²/с;
- ρ - густина пилу, кг/м³;
- ρ_e - густина газового потоку, кг/м³;
- g - прискорення вільного падіння, м/с².

ВСТУП

Актуальність роботи. Підприємства теплоенергетичної, чорної металургії, цементної, хімічної (коксохімічної), гірничої, паперової та інших галузей промисловості разом викидають в атмосферу більше 90% від загальної кількості речовин у вигляді суспендованих твердих частинок, не диференційованих за складом, або пилу. Забруднення повітря пилом призводить до соціальних та екологічних проблем.

Не менш важливе значення набуває процес вловлювання твердих частинок з газопилових потоків після технологічного обладнання для повного та комплексного використання сировини, оскільки в деяких випадках пил, що вловлюється, має певну цінність: наприклад, пил кольорових і рідкісних металів, коксовий і вугільний пил, повторне використання яких дозволяє знизити виробничі витрати.

Подальше застосування існуючих відцентрових пиловловлювачів є неефективним з точки зору економіки та екології, у зв'язку з чим виникає необхідність в їх заміні на більш ефективні та, як правило, більш енерго- та металоємні апарати.

Однією з причин обмеженого використання вихрових циклонних пиловловлювачів є відсутність надійних методів розрахунку газодинаміки і процесів, що в них відбуваються, а також критеріїв масштабного переходу від лабораторних моделей до виробничих установок. Це призводить до того, що існує багато розробок високоефективних циклонів, але їх широке розповсюдження стримується відсутністю чітких розрахунків та рекомендацій для здійснення переходу на необхідну продуктивність і зміну режимів роботи. Тому для конструювання нових та ефективного використання відомих циклонів необхідно удосконалювати методи розрахунку газодинаміки та процесу сепарації двофазних закручених потоків.

Визначальними характеристиками циклонних пиловловлювачів є ефективність сепарації і гідравлічний опір. Відомі методи розрахунку

ефективності циклонів, засновані на використанні емпіричних імовірнісних функцій, що описують параметри фракційної ефективності циклонних пиловловлювачів і дисперсний склад пилу, не відрізняються значною точністю. Це обумовлено тим, що функції масового розподілу часток за розмірами багатьох видів промислового пилу не відповідають логарифмічно-нормальному закону через дії декількох механізмів пилоутворення.

Застосування обчислювальних технологій та пакетів програм, дозволяє розраховувати, з прийнятною для практики точністю, гідродинамічні характеристики в турбулентних просторових стаціонарних вихрових течіях на стадії розробки і проектування промислових пристроїв, в тому числі пиловловлюючих, дозволяючи уникнути необхідності експериментальних випробувань, які багато коштують.

Викладене вище обумовлює актуальність обраної теми магістерської роботи, спрямованої на вирішення важливої науково-практичної та прикладної задачі - зниження техногенного навантаження на довкілля від пилових викидів промислових підприємств, вирішення якої дозволяє створити ефективні та економічно вигідні систем пиловловлювання. Тобто розробити обладнання, що забезпечує не тільки високу ефективність очищення газів, але й мінімально можливі капітальні витрати на його спорудження і, що дуже важливо, мінімально можливі питомі енерговитрати на його експлуатацію.

1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

1.1 Промислова та санітарна очистка газів

Боротьба із забрудненням атмосфери стала однією з найважливіших державних проблем соціального характеру. Стан повітряного басейну промислових районів визначається головним чином рівнем розвитку техніки очистки димових та інших газів промислових установок. Очищення технологічних викидів є частиною основного виробництва, яка повинна проектуватися одночасно з ним. Вірне застосування засобів техніки знепилювання повітря набуває особливого значення в сучасних умовах зростаючого забруднення атмосфери.

В останні роки об'єми викидів істотно зменшилися, що більшою мірою пояснюється спадом виробництва, а в меншій - здійсненням природоохоронних засобів. Багато технологічних процесів хімічної, вугільної та коксохімічної промисловості пов'язані з утворенням, отриманням або переробкою матеріалів, які виділяють пил. Санітарні системи очистки мають більше поширення в порівнянні з очисткою в транспортних системах переміщення дисперсних матеріалів. У той же час останні найбільше забруднюють навколишнє середовище.

Якщо в сфері оцінки шкідливих впливів на воду, ґрунт, повітря і в цілому в області екологічної експертизи виробництв і моніторингу середовища, статичному обліку кількості промислових і побутових, а також у створенні полігонів і смітників відходів є певні досягнення, то в напрямку розробки нових екологічно чистих і безпечних виробництв, досягнення й науково-технічна активність явно недостатні. Відомі підходи до проблеми техногенної безпеки розрізнені, часом відсутні науково обґрунтовані методики оцінки й кількісні критерії рівня небезпеки, недостатньо використовуються можливості в області комп'ютерних технологій, сучасних методів дослідження й математичне моделювання.

На багатьох промислових підприємствах України існує низький рівень техногенної безпеки, що проявляється в частих викидах шкідливих речовин у навколишнє середовище, збільшення кількості промислових відходів, зниження рівня надійності об'єктів, погіршення здоров'я населення тощо. Причинами такої ситуації є старіння основних фондів, відсутність або повільні темпи їх відновлення, низька якість проектної документації, відсутність належного контролю стану об'єктів, засобів автоматизації й захисту. Проте найважливішою причиною є відсутність єдиних наукових методів оцінки й аналізу техногенної безпеки об'єктів на стадії проектування, що призводить до створення техногенно-небезпечних об'єктів, через що в останні роки проблеми екології стали винятково актуальними [1, 2].

Фахівці Міжнародної організації праці (МОП) підрахували, що економічні витрати, пов'язані з професійними захворюваннями, складають 1% світового валового національного продукту [3, 4]. На ці кошти, орієнтовно, можна забезпечити харчування протягом року близько 75 млн. людей.

Забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов праці на промислових підприємствах вимагає очистки від пилу повітря, що подається в приміщення. Пиловмісне повітря являє собою систему у вигляді газоподібного дисперсного середовища і твердої дисперсної фази, що складається з частинок, що мають властивість знаходитись в несучому середовищі в зваженому стані більш-менш тривалий час. Промисловий пил відноситься до аерозолів - повітряні середовища, що містять зважені тверді і рідкі частинки розміром менше 1 мкм, що шкідливо діє на органи дихання людини [5] і в тому числі подразнюють шкіру, очі, вуха, ясна. Шкідливість пилу залежить від кількості, дисперсності і форми (структури) пилинок. Чим більше пилу витає в повітрі, чим дрібніше пил, тим він небезпечніший. Більш великі частки швидко осідають в повітрі, а при вдиханні затримуються в носоглотці та потрапляють до стравоходу. Частки розміром від 0,1 до 10 мкм в повітрі осідають повільно і проникають глибоко в легені. При цьому вони викликають професійні захворювання - пневмокніоз, які ведуть до обмеження дихальної здатності легень (силікоз, антракоз та ін.) Зміни,

викликані в легенях, розвиваються, як правило, повільно протягом декількох років. При пневмоконіозі (карбокониоз, антракоз, графітоз - при вдиханні вугільної, коксової пилу) [5] частинки вугілля затримуючись в легенях тривалий час, поступово викликають розростання навколо кожної пилинки сполучної тканини, яка не здатна сприймати кисень з повітря, насичувати їм кров і виділяти при видиху вуглекислоту. При тривалому стажі роботи в умовах підвищеної запиленості відбувається розростання сполучної тканини, яка поступово заміщає легеневу, знижуючи основну функцію легенів. Тривала недостатність кисню призводить до проблем з диханням (при швидкій ходьбі і роботі), ослаблення організму (перевантаження захисних та очищувальних механізмів організму), зниження працездатності, зниження опору організму інфекційним та іншим захворюванням, змінам функціонального стану інших органів і систем та організму в цілому [6]. В результаті всіх цих змін відбуваються поступово зростаючі порушення здоров'я людини, які можуть призвести до летального результату. В останніх стадіях пневмоконіозу хворі нерідко захворюють на туберкульоз, пневмонію, який пришвидшує настання смерті [5].

Нормальне атмосферне повітря має наступний склад (у % об'єму): азот - 78,8; кисень - 20,95; інертні гази - 0,93; вуглекислий газ - 0,03; інші гази - 0,01. Вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони обмежене вимогами ГОСТ 12.005-88 «Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования» та санітарними нормами проектування промислових підприємств [7]. Вміст шкідливих речовин в повітрі, що подається всередину виробничих приміщень, а також в повітрі, що повертається на рециркуляцію, не повинно перевищувати 30% від величини ГДК, встановлених для робочої зони [8]. Наведені норми встановлені, виходячи з умови, що при щоденній роботі в межах 8 годин протягом усього робочого стажу концентрація не може викликати у працюючих захворювань або відхилень у стані здоров'я, що виявляються сучасними методами дослідження, безпосередньо в процесі роботи або у віддалені терміни, в тому числі у наступних поколінь.

Запиленість у виробничих приміщеннях вимірюється ваговим способом, за яким визначається концентрація пилу в зоні робочого середовища. З метою виключення викиду запиленого повітря в приміщеннях створюються системи аспірації бункерів і місць пересипання матеріалів. Очищення повітря від пилу передбачається в циклонах і в рукавних фільтрах.

Крім цього, пил погіршує видимість на будівельних об'єктах, знижує світловіддачу освітлювальних пристроїв, підвищує абразивний знос рухомих частин машин і механізмів. В результаті знижується продуктивність і якість праці.

На підприємствах має здійснюватися систематичний контроль за вмістом шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Цей контроль проводять заводські санітарні лабораторії, а також міські або районні санітарно-епідеміологічні станції (СЕС). Застосування систем місцевої очистки забезпечує необхідний рівень ГДК в зоні дихання робітника при виробничих процесах, що вимагається законодавством усіх країн світу в сфері охорони праці та екології [9].

П'ята частина шкідливих речовин, що викидається зі стаціонарних джерел, потрапляє в повітря робочої зони, а з них - в атмосферу, і тому однією з основних проблем при вдосконаленні виробничих процесів є усунення або різке зменшення пиловиділення. Особливо гостро стоїть проблема вловлювання дрібнодисперсних фракцій, які завдяки малій густині, розсіюються та пересуваються на великі відстані з потоками повітря. Суттєве підвищення вимог до систем очистки неминуче призводить до ускладнення їх структури та різкого збільшення комплектуючих апаратів.

Виникло протиріччя: з одного боку - суттєво мають бути підвищені потенційні можливості систем очистки, з іншого боку - зросли труднощі в реалізації цих можливостей внаслідок експлуатаційних можливостей устаткування. Ускладнення систем пилоочистки, при одночасному підвищенні вимог щодо ефективності їх роботи, вимагає прийняття певних мір по розробці високоефективних апаратів пиловловлювання.

Техніка пиловловлювання характеризується великою різноманітністю конструкцій і форм виконання пиловловлюючого устаткування і може бути поділене: за призначенням, за основним способом дії, по ефективності, за конструктивними особливостями.

Однак циклонні апарати завдяки відносно невеликій вартості і простоті пристрою і обслуговування, порівняно невеликого опору та високої продуктивності є найпоширенішим типом пиловловлювачів. Із значного числа різних конструкцій циклонів особливо виділяються циклони НДЮГАЗ внаслідок їх достатньою вивченості та надійності.

Істотного зниження пиловиділення на робочих місцях і викиду в повітря навколишнього середовища можна досягти за допомогою системного підходу до аналізу фізичних властивостей пилу, концентраційних коливань запиленого потоку, характеристик пиловловлювачів.

Устаткування, що застосовується для очищення повітря від пилу в системах вентиляції, кондиціонування і повітряного опалення, а також для захисту від забруднення пилом повітряного середовища будівель, споруд та прилеглих до них територій, метрополітенів, підземних і відкритих гірничих виробок, поділяється на такі типи:

- устаткування, що застосовується для очищення повітря від зважених часток пилу, що подається в приміщення системами вентиляції, кондиціонування і повітряного опалення - повітряні фільтри;

- устаткування, що застосовується для очищення повітря від пилу, що викидається в атмосферу системами витяжної вентиляції - пиловловлююче обладнання або пиловловлювачі.

Пиловловлювачі в залежності від способу відділення пилу від повітряного потоку застосовують в наступних виконаннях: обладнання для вловлювання пилу сухим способом, при якому відділені від повітря частки осідають на суху поверхню; обладнання для уловлювання пилу мокрим способом, при якому відділення часток від повітряного потоку здійснюється з використанням рідин.

За принципом дії пиловловлююче обладнання підрозділяється на наступні групи: гравітаційне, інерційне, фільтраційне, електричне.

1.2 Очистка газів в циклонах

Пиловловлююче обладнання при всьому його різноманітті може бути розцінено за рядом ознак: за призначенням, за основним способом дії, за ефективністю, за конструктивними особливостями.

Згідно представленої в [10 -14] класифікації, пристрої для вловлювання пилу за ступенем очищення діляться на апарати грубої очистки і апарати тонкого знепилювання, а за способом пиловловлювання на сухі і мокрі. Класифікація пиловловлювачів за їх ефективністю в залежності від ступеня дисперсності пилу представлена в таблиці 1.1. Група дисперсності пилу визначається за класифікаційною номограмою (рис.1.1) [23]. Розміри часток найбільш поширених аерозолів і апарати для їх вловлювання наведено на рисунку 1.2 [15]. Основні характеристики широко вживаних пиловловлювачів в промисловості, в тому числі і для очищення димових газів від виносу золи в теплоенергетиці, наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.1 - Класифікація пиловловлювачів по їх ефективності в залежності від ступеня дисперсності пилу

Клас пиловловлювача	Розміри частинок пилу, що ефективно вловлюються, мкм	Нижня межа ефективності в залежності від дисперсності пилу	
		Група пилу за дисперсністю	Ефективність, %
I	Більше 0,3-0,5	{ V IV	<80 99,9-80
II	Більше 2	{ IV III	92-85 99,9-92
III	Більше 4	{ III II	99-80 99,9-99
IV	Більше 8	{ II I	99,9-95 >99,9
V	Більше 20	I	>99

Рисунок 1.1 - Класифікаційна номограма пилю:

I - V - зони класифікаційних груп пилю за їх дисперсністю; I - дуже крупнодисперсний пил; II - крупнодисперсний пил; III - середньодисперсний пил; IV - дрібнодисперсний пил; V - дуже дрібнодисперсний пил.

Таблиця 1.2 - Характеристики широко вживаних пиловловлювачів в промисловості

Пиловловлювачі			Область найбільш доцільного застосування по групах дисперсності пилу					Гідравлічний опір, Па	
Вид	Тип	Клас							
			I	II	III	IV	V		
Гравітаційні	Пилоосаджувальні камери	V	+	+	-	-	-	$2 \cdot 10^2$	
Інерційні	Циклони великої продуктивності (одиначні і групові)	V	+	+	-	-	-	$6 \cdot 10^2$	
	Циклони великої ефективності	IV	-	+	+	-	-	$2 \cdot 10^3$	
	Батарейні циклони	IV	-	+	+	-	-	$2 \cdot 10^3$	
	Відцентрові скрубери і циклони-промивачі	IV	-	+	+	-	-	$1 \cdot 10^3$	
	Струйні типу ротоклон		III	-	-	+	-	-	$1,2 \cdot 10^3$
			II	-	-	+	+	-	$3,4 \cdot 10^3$
	Скрубери Вентурі		III	-	-	+	+	-	$1,3 \cdot 10^5$
II			-	-	+	+	-	$3,4 \cdot 10^3$	
I			-	-	-	+	+	$\geq 10 \cdot 10^3$	
Пінні апарати		II	-	-	+	+	-	$2 \cdot 10^3$	
Тканеві	Сітчасті (для вловлювання волокнистого пилу)	V	+	-	-	-	-	$(4-8) \cdot 10^2$	
	Матерчаті (рукавні)	III	+	+	-	-	-	$6 \cdot 10^2$	
		II	-	-	+	+	+	$1,5 \cdot 10^3$	
Електричні	Електричні пластинчасті	I	-	-	-	+	-	$2,5 \cdot 10^3$	
		II	-	-	+	-	-	$\leq 3 \cdot 10^2$	
		I	-	-	-	+	+	$6 \cdot 10^2$	

Наведені в таблицях 1.1 та 1.2 дані і номограма (рисунок 1.1) [16, 17] дозволяють зорієнтуватися у виборі того чи іншого типу пиловловлювача, який би забезпечив необхідний ступінь очищення газів і відповідав би деяким іншим найбільш важливим технічним характеристикам для конкретних умов виробництва. Розрахувати ж вибрані апарати, тобто визначити їх режимно-геометричні параметри на основі цих матеріалів неможливо.

Рисунок 1.2 - Розміри частинок найбільш поширених технічних і природних аерозолів і апарати для їх вловлювання [15]

Одним з найбільш поширених пристроїв пилоочисної техніки вважається циклон (від грец. *kyklos* - кружляють, що обертається). Їх широке поширення обумовлено простотою пристрою циклону, надійністю в експлуатації, і невеликих капітальних і експлуатаційних витратах [18 - 21].

Найбільш доступним, ефективним і поширеним методом пилоочистки є спосіб сухого пиловловлювання при якому застосовується велика кількість апаратів, що відрізняються один від одного як за принципом дії, так і за конструктивним виконанням.

Застосовують праві (напрямок потоку повітря - за годинниковою стрілкою, якщо дивитися зверху) і ліві (напрямок потоку повітря - проти годинникової стрілки, якщо дивитися зверху) циклони. Циклони звичайно підрозділяються на високоефективні і високопродуктивні. Апарати першого типу відрізняються більш високою ефективністю, але вимагають великих затрат часу на здійснення процесу очищення, другі мають невеликий гідравлічний опір, відрізняються великою продуктивністю, але одночасно гірше вловлюють дрібні частинки пилу.

У відцентрових пиловловлювачах для осадження часток пилу використовується відцентрова сила (циклони, жалюзійні, ротаційні, вихрові та динамічні апарати). Пило-газовий потік з великою швидкістю по дотичній надходить у циліндричну частину корпусу циклона, і робить рух по низхідній спіралі. Під дією відцентрової сили, що виникає при обертальному русі потоку, пилоподібні частки переміщуються до стінок циклону. Пил відділяється від повітря при переході повітряного потоку з низхідного в висхідний, і, по конічній частині корпусу циклону потрапляють через пило-збірний отвір в бункер для збору пилу. Тому вони, завдяки простоті конструкції та обслуговування, невисокій вартості, порівняно невеликому опору та високій продуктивності, є найпоширенішими типами сухого пиловловлювання.

На рисунку 1.3 схематично представлені основні типи конструкцій циклонних пиловловлювачів, які відрізняються за способом підведення пилогазового потоку в апарат: із спіральним (рисунок 1.3 а), тангенціальним звичайним (рисунок 1.3 б), гвинтоподібним (рисунок 1.3 в) і осьовим (рисунок 1.3 г, д). Циклони з осьовим підведенням потоку працюють як з поверненням потоку у верхню частину апарата, так і без нього (рисунок 1.3 д). Останній тип (рисунок 1.3 е) апаратів (прямоточні циклони) відрізняється низьким гідравлічним опором і меншою, у порівнянні з циклонами інших типів,

ефективністю пиловловлювання, а також необхідністю підсосу частини потоку через бункер, а це сприяє його абразивному зношуванню.

а *б* *в* *г* *д* *е*

а - „Гіпродрева“; б - „Гіпродревпрома“; в - типу „К“; г - „ВНДІОПа“; д - „СІОПа“; е - „НДІОгазу“; 1- вхідний патрубок; 2 - корпус; 3 - вихідний патрубок

Рисунок 1.3 - Відцентрові пиловловлювачі

Найбільш кращим за формою, з погляду аеродинаміки, є підведення потоку по спіралі, однак на практиці всі способи підведення можуть застосовуватися з рівною ефективністю [22, 23].

Рух пилогазового потоку в циклоні носить досить складний характер і, незважаючи на велику кількість теоретичних робіт, вивчений ще недостатньо. Циклонні пиловловлювачі мають наступні переваги: відсутність рухомих частин в апараті; простота виготовлення; майже постійний гідравлічний опір; можливе вловлювання абразивних матеріалів при захисті внутрішніх поверхонь спеціальними покриттями; успішно працюють при високих тисках [24, 25]. Поряд із цим слід мати на увазі, що гідравлічний опір високоефективних циклонів досягає 1250 - 1500 Па, а частинки розміром меншими за 10×10^{-6} м при цьому вловлюються недостатньо.

Найбільше поширення в системах газоочистки та аспірації на підприємствах одержали циклони НДІОгазу й СІОП. Циклони НДІОгазу підрозділяються на підгрупи: циліндричні й конічні (рисунок 1.4).

а - ЦН, б - СДК-ЦН-33, в - СЦН-40

Рисунок 1.4 - Конструкції циклонів

Циліндричні (рисунок 1.4 а) високопродуктивні циклони залежно від кута нахилу гвинтової кришки корпусу до горизонталі бувають чотирьох типів: ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15В, ЦН-24 (ЦН - циклон НДІОгазу, цифра - кут нахилу в градусах, В - вкорочений). Чим менший кут нахилу кришки, тим вища ступінь очищення й гідравлічний опір циклона, тому циклони ЦН-24, зазвичай, застосовуються для попереднього очищення або уловлення грубих частинок, циклони ЦН-11 придатні для ефективного вловлювання більш дрібних частинок, але при підвищеному в порівнянні з ЦН-24 опорі.

Конічні (рисунок 1.4 б), або високоефективні циклони поділяються на: СК-ЦН-34 і СК-ЦН-22, де С - наявність спірального вхідного патрубку («равлика»), Д - довгоконічні, К - конічні, цифра - відношення діаметру вихлопної труби до діаметру циліндричної частини корпусу. Порівняння їх характеристик показує, що найбільш ефективним є циклон СК-ЦН-22, але при цьому втрати тиску в ньому надзвичайно великі. Так, при вловлюванні дрібнодисперсного пилу шихти ступінь очищення в циклоні СК-ЦН-22 діаметром 0,2 м становить 97,9 - 99,7%, однак втрати тиску при цьому досягають 8,1 - 8,9 кПа. Недоліком такого варіанту є деяке збільшення габаритів і металоємності циклона.

У літературі зустрічається велика кількість модифікацій пиловловлювачів, отриманих при внесенні в конструкцію циліндричних циклонів НДІОГАЗа змін, які в більшості випадків спрямовані не на зниження енергетичних витрат з очищення, а на збільшення ефективності пиловловлювання. У даній роботі розглядаються і піддаються порівнянню лише найбільш поширені і найбільш цікаві по своєму пристрою і конструктивному рішенню апарати, які можуть бути використані для очищення промислових запилених газоповітряних потоків.

Циклон-сепаратор, розглянутий в [26], складається з циліндричного корпусу 5 (рисунок 1.5) з конічним днищем 6, тангенціального штуцера 3 для входу запиленого газу, штуцера 7 для видалення пилу, вихлопної труби 4 і поміщеного співвісно в корпус, утворюючи при цьому зазор, циліндричного корпусу 7 з конічним днищем 2 меншого діаметру, що має поздовжні щілини постійної або змінної ширини, що мають нахил відносно вертикалі, або перфорацію отворами трапецеїдальної форми.

Принцип дії полягає в наступному. Пило-газовий потік тангенціально вводиться через штуцер і потрапляє в циклон-сепаратор. Під дією відцентрової сили частки пилу переміщуються до стінок циліндричного корпусу з конічним днищем, що мають щілини або перфорацію, через які тверді частинки потрапляють в зазор між циліндричними корпусами і конічними днищами.

1 - внутрішній циліндричний корпус; 2 - внутрішнє конічне днище; 3 - вхідний тангенціальний штуцер; 4 - вихідна труба; 5 - зовнішній циліндричного корпусу; 6 - зовнішнє конічне днище; 7 - штуцер для видалення пилу; 8 - кришка зовнішнього корпусу

Рисунок 1.5 - Циклон-сепаратор [26]

Кільцевий зазор в даній конструкції пиловловлювача виконує роль пастки для часток пилу. Це дозволяє швидко відводити частинки із зони закручування потоку і запобігти їх повернення в газовий потік, так як частинки мають тенденцію відскакувати від стінки і повертатися в основний потік. Використання пропонованого циклону-сепаратора, на думку авторів [26], дозволяє забезпечити високу ефективність очищення. Експериментальних даних по ефективності пиловловлювання і гідравлічному

опору автори не наводять, у зв'язку з цим представляє певну трудність провести аналіз за ступенем очищення та енергоефективності запропонованого пристрою.

Конструкція циклону-сепаратора авторів [26] заслуговує на увагу на тій підставі, що якщо в кільцевому зазорі створюється тиск менше, ніж у внутрішньому корпусі циклону, слід очікувати високого ступеня очищення запиленого потоку. В іншому випадку слід очікувати добру сепарацію великих частинок і низьку - дрібних. Слід очікувати збільшення гідравлічного опору циклона в порівнянні з гладкостінними, через перфорації внутрішньої стінки в разі відсутності стоку за отворами або поздовжніми щілинами.

Запропонований фільтр-циклон [27], що включає корпус 1 та внутрішню перфоровану камеру 2, виконану з щілинними вікнами 3, які розташовані в першій чверті циліндричної частини, обладнану вихлопною трубою 4 та тангенційним вхідним патрубком 5. Корпус 1 та камера 2 утворюють ємність для збору від сепарованого пилу та уведення її через перший концентричний пиловипускний отвір 6 в бункер 7 зображено на рисунку 1.6. В нижній частині внутрішньої камери 2 встановлена циліндрично-конічна вставка 8, яка з патрубком 9, що прикріплено знизу до камери 2, утворює другий пиловипускний отвір 10, з'єднаний з бункером 7.

Робота фільтра-циклону здійснюється наступним чином. Запилений газовий потік через вхідний патрубок 5 поступає до внутрішньої камери 2 сепаратора, де за рахунок відцентрових сил відбувається концентрування твердих часток в пристінному шарі вихра та відведення їх крізь щілинні вікна 3, розміщених в першій чверті циліндричної частини внутрішньої камери 2. Основний потік у внутрішній камері сепаратора створює низхідний потік з сепарацією часток в ньому до стінок камери 2 та їх подальшим потраплянням в бункер 7 через пиловипускний отвір 10. Висхідний потік очищеного газу через вихлопну трубу 4 викидається в атмосферу.

1 - корпус; 2 - внутрішня перфорована камера; 3 - щілинні вікна; 4 - вихлопна труба; 5 - тангенційний вхідний патрубок; 6 - перший пиловипускний отвір; 7 - бункер; 8 - циліндрично-конічна вставка; 9 - патрубок; 10 - другий пиловипускний отвір

Рисунок 1.6 - Відцентровий сепаратор [27]

Не викликає сумнівів, що запропонована конструкція забезпечує високу ступінь очищення, порівняно з ефективністю рукавних фільтрів. Оцінки гідравлічного опору фільтруючих елементів, що використовуються в техніці знепилювання, показують їх значне перевищення в порівнянні з традиційними циклонами. Проте низька ефективність вловлювання твердих часток діаметром менше 10 мкм та можливість потрапляння осаджених в бункері 7 часток назад до основного потоку накладають обмеження на широке розповсюдження запропонованого авторами [27] оригінального по виконанню пристрою.

Інша конструкція циклону, що має фільтруючий елемент, запропонована в [28] (рисунок 1.7). Циклон містить вхідний патрубок 1 і вихідний патрубок газу 6, корпус 5, що складається з циліндричної і конічної частин, гвинтоподібну кришку 3, вихлопну трубу 6, фільтруючий елемент 2, закріплений на одному з кінців вихідного патрубка очищеного газу.

1 - вхідний патрубок; 2 - фільтруючий елемент; 3 - гвинтоподібна кришка;
4 - каркас для фільтруючого елемента; 5 - корпус; 6 - вихідний патрубок

Рисунок 1.7 - Циклон з фільтруючим елементом [28]

У даній конструкції запилений газовий потік надходить в циклон через вхідний тангенціальний патрубок 1, закручується і рухається по низхідній гвинтовій лінії уздовж стінок апарата. В результаті цього частинки пилу під дією відцентрової сили рухаються від центру апарата до периферії і, досягаючи стінок апарата, транспортуються вниз в конічну частину корпусу для збору вловленого пилу. Очищене повітря виводиться з циклону через вихідний патрубок, при цьому легкі дрібнодисперсні фракції часток пилу, не вловлені в конічну частину корпусу, затримуються на фільтруючому елементі. Фільтруючий елемент може бути виконаний у вигляді тіла обертання. Гідравлічний опір фільтруючого елемента складає 15-25% від гідравлічного опору всього апарата.

До недоліків цього циклону можна віднести всі перераховані вище, що стосуються складності конструкції і гідравлічного опору розглянутого в [27] фільтра-циклону. Додатково можна відзначити, що в процесі накопичення дрібнодисперсного пилу на фільтрі буде відбуватися значне збільшення повного гідравлічного опору циклона, і частка опору фільтруючого елемента буде зростати. Крім того, установка фільтра в вихідному патрубку не забезпечує безперервності роботи циклона через необхідність періодичного очищення фільтруючого елемента, що також знижує область застосування його в безперервно діючих технологічних схемах.

Розроблена конструкція циклофільтра [29] з тканинним фільтруючим елементом, обладнаним системою регенерації, зображено на рисунку 1.8.

Циклофільтр містить корпус, який складається з циліндричної (зовнішньої), циліндрично-5 конічної (внутрішньої) частин, тангенціальний вхідний патрубок, з'єднаний з внутрішнім циліндричним корпусом, що з'єднаний з зовнішнім корпусом жалюзійним елементом з площею прохідного перерізу 25-27 % від $\frac{1}{4}$ площі стінки циліндричної частини, пиловипускний отвір і вихлопну трубу. Додатково циклофільтр має фільтр-патрон, обладнаний системою регенерації, виконаний у вигляді циліндричного стрижньового каркаса з верхнім та нижнім фланцями та 10 гофрованим фільтруючим матеріалом між ними, який

встановлений співвісно циліндричним корпусам циклонних елементів у внутрішній частині циліндричного корпусу.

1 - вхідний патрубок; 2 - внутрішній циліндричний корпус апарата;
3 - зовнішній циліндричний корпус; 4 - внутрішній бункер; 5 - зовнішній бункер;
6 - каркас фільтр-патрона; 7 - фільтр-патрон; 8 - щільові зазори; 9 - опорна шайба;
10 - вихідний патрубок

Рисунок 1.8 - Циклофільтр з тканинним фільтруючим елементом [29]

Циклофільтр працює наступним чином: запилений газовий потік потрапляє по вхідному патрубку 1 у внутрішній циліндричний корпус апарата 2. За рахунок відцентрових сил, що діють на частки пилу, вони концентруються в першій чверті діаметра циліндра та через щільові зазори 8 відводяться у

зовнішній циліндричний корпус 3. Таким чином, крупнодисперсна фракція осідає в бункері 5. Очищений від крупнодисперсної фракції пилу потік, обертаючись у внутрішньому циліндричному корпусі апарата, фільтрується у встановленому в його центрі гофрованому фільтр-патроні та виходить очищеним з вихідного патрубку 10, розташованого на опорній шайбі 9.

Система регенерації фільтр-патрона 7 виконана імпульсною з ресивером стиснутого повітря, електромагнітними клапанами (на кресленні не вказано), соплами Вентурі, продувними трубами з соплами на кінцях та блоком керування регенерації (на кресленні не вказано), з'єднаними з загальним компресором, що керує роботу фільтра у всіх режимах фільтрації, причому надлишковий тиск стиснутого повітря складає приблизно $P_n=0,4 \dots 0,8$ МПа; тривалість 50 імпульсу $\tau=0,1 \dots 0,2$ с.

До недоліків аналога можна віднести малу площу жалюзійного елемента та форму його профілю, що призводить до відведення невеликої кількості крупно дисперсних часток з газового потоку у зовнішній корпус циклофільтра.

Прагнення до оптимізації процесів пилоочистки, спрямованої на отримання гармонійного співвідношення величин ступеня уловлювання та гідравлічних втрат газоочисного обладнання - актуальний в даний час напрямок у створенні енергоефективних установок циклонного типу, як найбільш надійних і простих у виготовленні і експлуатації.

Досить скупа інформація по новим технічним засобам і конструкціям пиловловлюючих пристроїв, що використовують нетрадиційні рішення, що включають в себе установку внутрішніх фільтруючих елементів, дає право розглядати запропоновані рішення напрямком подальших експериментальних і модельних досліджень з метою розуміння фізичного механізму комбінованої очистки, управління та оптимізації процесів в сепараційних та пиловловлюючих установках.

1.3 Розрахунок ефективності та енерговитрат в циклонах

Вибір типу циклона має проводитися на підставі техніко-економічних розрахунків [30 - 32]. До основних характеристик пиловловлюючого обладнання відносяться: ефективність (ступінь) очистки повітря від пилу, яку також іноді називають коефіцієнтом корисної дії апарата, хоча це не відображає її енергетичні характеристики; гідравлічний опір; витрати електричної енергії; вартість очищення.

Ефективність (ступінь) очищення повітря від пилу - знаючи величину концентрації пилу в повітрі до очистки $C_{вх}$, і після очистки $C_{вих}$ (відповідно мг/м³), виражається у відсотках, іноді в частках від одиниці:

$$(1.1)$$

За наявності підсосу повітря (наприклад, в рукавних фільтрах) ефективність визначається за формулою:

$$(1.2)$$

де $Q_{вх}$, $Q_{вих}$ - відповідно витрати повітря на вході та виході з апарата, м³/год.

У разі встановлення декількох апаратів (каскадна, або багатоступенева очистка), що застосовується для більш повної очистки повітря, сумарна ефективність очищення визначається за формулою:

$$(1.3)$$

де $\eta_1, \eta_2 \dots \eta_n$ - ефективність очистки, що визначається для кожного апарата, які входять в каскад (в частках від одиниці).

Ефективність очистки - найважливіша характеристика апарата. На неї орієнтуються при виборі пиловловлюючого обладнання у відповідності з допустимим залишковим вмістом часток пилу або золи в повітрі, що очищується.

Порівнюючи два апарати, співставляють відсотки пропущеного пилю. Якщо ефективність одного апарата 99%, а іншого 98%, то вони пропускають відповідно 1% і 2% пилю. Отже, ефективність першого апарата в два рази вище другого.

Для повної характеристики апарата потрібно знати його фракційну ефективність. Вона показує частку вловленого пилю по кожній фракції. Це дозволяє вибрати пиловловлююче обладнання у відповідності з фракційним складом пилю. Фракційна ефективність очищення виражається відношенням

$$\eta_{fn} = \frac{c_n}{C_n} \quad (1.4)$$

де c_n - концентрація пилю, що вловлюється, даної фракції;
 C_n - концентрація пилю даної фракції, що поступає в апарат.

Загальну ефективність апарата ϵ за фракційною ефективністю визначають наступним чином:

$$\epsilon = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n} \quad (1.5)$$

де C_1, C_2, \dots, C_n - концентрації пилю відповідних фракцій, що поступають в апарат; $\eta_{f1}, \eta_{f2}, \dots, \eta_{fn}$ - фракційна ефективність вловлювання за даною фракцією.

Відношення кількості пилю даної фракції до загальної кількості пилю, що потрапляє в апарат, визначається:

$$\eta_{fn} = \frac{c_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n} \quad (1.6)$$

Після перетворення отримаємо значення загальної ефективності очистки:

$$\epsilon = \eta_{f1} + \eta_{f2} + \dots + \eta_{fn} \quad (1.7)$$

Або у відсотках:

(1.8)

Продуктивність характеризується кількістю повітря, що очищується за одну годину. Апарати, в яких повітря очищається при проходженні через фільтруючий шар, характеризуються питомим повітряним навантаженням, тобто кількістю повітря, яке проходить через один квадратний метр фільтруючої поверхні за одну годину.

Вартість очищення є найважливішим показником, тому що характеризує його економічність. Вона залежить головним чином від капітальних витрат на обладнання і експлуатаційних витрат. Капітальні залежать від конструктивних особливостей і встановлених потужностей обладнання. Експлуатаційні витрати залежать в основному від витрати електричної енергії, які визначаються споживаною потужністю циклону. Ця потужність залежить від гідравлічного опору циклона (втрати тиску в ньому ΔP)

(1.9)

де $v_{\text{вх}}$ - швидкість потоку у вхідному патрубку, м/с; $\zeta_{\text{вх}}$ - коефіцієнт гідравлічного опору циклона; ρ - густина газу.

Якщо втрати незначні, то можна переходити до визначення повної ефективності очистки запиленого потоку в циклоні.

Приймаючи за таблицею 1.3 значення d'_{50} та $\lg \sigma_{\text{ч}}^T$ для табличних умов, визначають значення d_{50} при робочих умовах за рівнянням, яке отримане з критерію Стокса, що розглядалося в діапазоні Стоксівського закону опору середовища:

Таблиця 1.3 - Параметри, що визначають ефективність циклону

Параметри	ЦН-24	ЦН-15у	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СДК-ЦН-34	СИОТ	ВІЦНИИ ОТ
d_{50}^T , МКМ.	8.5	6.0	4.5	3.65	2.31	1.13	2.6	8.6
$\lg \sigma_{\text{ч}}^T$	0.303	0.283	0.352	0.352	0.364	0.340	0.28	0.32
$V_{\text{опт}}$, м/с	4.5	3.5	3.5	3.5	2.0	2.0	1.0	4.0
Примітка: Значення d_{50}^T в таблиці відповідає наступним умовам експлуатації циклонів: середня швидкість газу в циклоні $V = 3,5$ м/с; діаметр циклона $D = 600$ мм; густина часток $\rho = 1930$ кг/м ³ ; динамічна в'язкість газу $\mu = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с.								

(1.10)

Визначають параметр x за формулою:

(1.11)

За графіком на рисунку 1.9 визначається значення функції $\Phi(x)$ та визначається ефективність циклона η :

(1.12)

Рисунок 1.9 - Графік значення функції $\Phi(x)$

Витрати електричної енергії на процес пиловловлення визначаються споживаною потужністю циклону:

$$N = \Delta P \cdot Q \quad (1.13)$$

де $Q = v_{\text{ex}} \cdot \omega_{\text{ex}}$ - витрати повітря, $\omega_{\text{вх}}$ - площа вхідного живого перерізу.

(1.14)

Таким чином, витрати електроенергії істотно залежать від швидкості повітря в пиловловлювачі. Витрати електроенергії при одноступінчастій очистці знаходиться в межах від 0,035 до 1,0 кВт·год на 1000 кубічних метрів повітря.

Вартість очистки повітря в різних апаратах значно відрізняється. Як правило, більш ефективне очищення обходиться значно дорожче. Якщо вартість очистки певної кількості повітря в такому порівняно простому апараті, як циклон великої продуктивності прийняти за 100%, то вартість очищення такої ж кількості повітря в батарейному циклоні складе 120%, в циклоні з водяною плівкою 130%, в електрофільтрах, в яких електроенергія витрачається в основному на створення електростатичного поля, вартість очищення зростає до 220%, в тканинних фільтрах (в залежності від типу) за рахунок збільшення гідравлічного опору в міру забруднення фільтра від 260 до 280%.

Вартість високоефективної двоступеневої очищення за схемою батарейний циклон-електрофільтр складе 330%.

1.4 Постановка задачі магістерської дисертаційної роботи

Сформулювати фізичну модель процесу пиловловлювання в циклонному пиловловлювачі.

Розробити математичну модель, яка дозволяє адекватно описати вплив технологічних і конструктивних параметрів на ступінь очистки і гідравлічний опір циклонного пиловловлювача.

Отримати аналітичні залежності для розрахунку гідравлічного опору створеного пиловловлювача від його продуктивності, визначити коефіцієнт втрат тиску в апараті.

Отримати аналітичні залежності для розрахунку ефективності пиловловлювання в створеному апараті за математичною моделлю процесу сепарації в ньому.

За результатами досліджень розробити методику та алгоритм розрахунку промислового зразка циклофільтра для очистки запиленого потоку

1.5 Висновки до розділу

Тверді частки здатні впливати на екологічну обстановку в локальному і глобальному масштабах, про що свідчать наслідки аварії ЧАЕС. Існуючий парк золовловлюючого устаткування, що знаходиться на українських ТЕС, що працюють на вугіллі, недостатньо ефективний, економічний і не задовольняє сучасні санітарні вимоги. Вирішення цієї проблеми може бути досягнуто створенням нових високоефективних апаратів для комплексного очищення газів від твердих часток згідно з вимогами санітарних норм на викиди в атмосферу [31, 33 - 36].

Проведений аналіз стану проблеми технологічних викидів в атмосферу на коксохімічних підприємствах з установками сухого гасіння коксу та розробкою засобів для вловлювання пилу показав, що при виборі апаратів для вловлювання коксового пилу, виходячи з досить ефективної роботи існуючих циклонів, але маючих головним недоліком високий гідравлічний опір, та маючи на увазі необхідність ліквідації водно-шламового господарства пиловловлювання, перевагу слід віддати сухим методам та апаратам.

Також слід зазначити високу ефективність використання фільтруючих патронів для вловлювання дрібнодисперсного пилу. У зв'язку з цим, конструктивні особливості апаратів [27, 29] є найбільш цікавими, так як в них поєднана суха очистка, як в циклонних апаратах, з високоефективною очисткою запиленого повітря в фільтруючих елементах. Але наявність недоліків та недостатня експериментальна вивченість цих апаратів, дає право розглядати запропоновані рішення напрямом для подальшого теоретичного та експериментального дослідження з метою створення нового або вдосконалення вже існуючого пиловловлюючого обладнання.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЗІВ В ЦИКЛОННОМУ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ

2.1 Фізична модель процесу очищення димових та технологічних газів в циклонному пиловловлювачі

У відцентрових пиловловлювачах (циклони, ротаційні, вихрові та динамічні апарати) для осадження частинок пилу використовується відцентрова сила. Завдяки простоті конструкції та обслуговування, невисокій вартості, порівняно невеликому опору та високій продуктивності вони є найпоширенішими типами сухого пиловловлювання.

Модель руху частинки в циклонному пиловловлювачі під дією відцентрових сил показано на рисунку 2.1 [37-39].

Запилений потік вводиться у внутрішній корпус апарата, з радіусом R_2 , через вхідний патрубок тангенціально зі швидкістю V_{ex} . Завдяки тангенціальному введенню, потік набуває обертового руху навколо вихідної труби радіуса R_1 для відведення очищеного повітря [40-41]. В потоці на частинку, окрім сили тяжіння G , Архімеда A і тертя S , діє відцентрова сила F_v , що перпендикулярна до дотичної до дуги. Відцентрова сила набагато більша за силу тяжіння [40-41].

В полі відцентрових сил частинка рухається до стінки внутрішнього корпусу циклонного пиловловлювача. Частинки, що досягли стінки внутрішнього корпусу циклонного пиловловлювача, в області жалюзійного елемента відводяться у зовнішній корпус апарата. Таким чином відбувається зменшення початкової концентрації пилу в газовому потоці. У зовнішньому корпусі частинки осідають переважно під дією сили тяжіння, тому щовідбувається різке зменшення тангенціальної швидкості, а отже і зменшення відцентрової сили, що діє на частинку.

$V_{\text{вх}}$ - швидкість запиленого потоку на вході в циклон;
 $V_{\text{т}}$ - тангенціальна швидкість; $F_{\text{в}}$ - відцентрова сила; $V_{\text{ф}}$ - колова швидкість руху частинки; C_1, C_2, C_3, C_4 - концентрація пилу в газовому потоці на вході в апарат, в газовому потоці що відводиться у зовнішній корпус апарата через жалюзійний елемент, в газовому потоці, що продовжує обертатися у внутрішньому корпусі після проходження області жалюзійного елемента та в газовому потоці на виході з апарата відповідно; m_1, m_2, m_3, m_4 - маса пилу на вході в апарат, що відводиться у зовнішній корпус апарата через жалюзійний елемент, що продовжує обертатися у внутрішньому корпусі після проходження області жалюзійного елемента та на виході з апарата, відповідно

Рисунок 2.1- Рух частинки в циклонному пиловловлювачі в полі відцентрових сил

Частинки, що не потрапили у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача, рухаються у сформованому обертовому потоці утворюючи при поверхневий пиловий шар, що опускається по кільцевому простору, утвореному внутрішньою поверхнею циліндричної частини внутрішнього циліндричного корпусу апарата і вихідною трубою, і потрапляє в конусну

частину. Частинки пилу під дією відцентрової сили притискаються до стінок корпусу циклона і в нижній частині конусного днища відділяються і опускаються через пиловідведний отвір у внутрішній бункер пилуз частиною повітря. Потрапивши у внутрішній бункер і звільнившись від пилу частина повітря повертається в циклонний пиловловлювач через центральну частину пиловідведеного отвору, даючи початок внутрішньому вихру очищеного газу, що залишає апарат. По мірі руху цієї частини газу в сторону вихідної труби до неї поступово приєднуються порції газів з основного потоку.

У конусній частині потік газу повертається і рухається вгору до вихідної труби, через яку виходить з апарата, утворюючи внутрішній обертовий вихор. Внаслідок дії внутрішнього обертового вихру частина пилу з приповерхневого пилового шару виноситься у вихідну трубу. Причому, чим більша товщина приповерхневого пилового шару, тим більше пилу виноситься у вихідну трубу. Завдяки зменшенню початкової концентрації пилу зменшується й товщина пристінного пилового джгута, відповідно й зменшується винос частинок пилу у вихідну трубу.

В циклонному пиловловлювачі вловлений у зовнішньому корпусі пил збирається у зовнішньому бункері, а пил, що вловлюється у внутрішньому корпусі, збирається у внутрішньому бункері. Зовнішній і внутрішній бункери герметично ізольовані один від одного, тим самим запобігається переток газового потоку між корпусами циклонного пиловловлювача.

2.2 Математична модель аеродинамічного опору циклонного пиловловлювача

Важливою характеристикою циклонів є їх аеродинамічний опір, що можна представити наступним виразом

$$R_{\text{цикл}} = \zeta_{\text{цикл}} \rho V_{\text{вх}}^2, \quad (2.1)$$

де $\zeta_{\text{цикл}}$ - коефіцієнт опору циклона, що визначається експериментально; ρ - густина потоку, кг/м^3 ; $V_{\text{вх}}$ - швидкість вхідного потоку, м/с [42].

Динаміка руху повітря в циклонних апаратах описана рівняннями Нав'є-Стокса, що можна представити у векторній формі [43]

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} P - \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (2.2)$$

де \vec{v} - вектор швидкості повітря, м/с; \vec{F} - вектор масової сили; ρ - густина повітря, кг/м³; P - тиск повітря у будь-якій точці, Па; ν - кінематична в'язкість повітря, м²/с; t - час, с.

Рівняння (2.2) може бути представлене у вигляді, що не містить тиск P [44]:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} P - \rho \vec{g} + \vec{F} - \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{v}), \quad (2.3)$$

де $[\vec{\nabla} \times \vec{v}] = \vec{\nabla} \times \vec{v}$; \times - знак векторного множення.

Перетворивши рівняння (2.3) через систему трьох скалярних рівнянь отримаємо [37]:

$$\left\{ \begin{array}{l} ; \\ ; \\ \text{де: } ; \\ ; \\ ; \\ ; \\ ; \\ ; \\ ; \end{array} \right. \quad (2.4),$$

де: r, φ, Z - вісі циліндричної системи координат.

Система рівнянь (2.4) не має аналітичного розв'язку. Однак, в потенційному полі масових сил при колінарності ротора \vec{F} вектору швидкості, отримаємо:

$$, \quad (2.5)$$

і система (2.4) значно спрощується:

$$(2.7)$$

$$(2.6)$$

Позначимо:

$$, \quad (2.7)$$

$$,$$

$$.$$

Останнє рівняння (2.7) можна записати у вигляді

$$(2.8)$$

Тоді система (2.6) перетвориться в рівняння з відомими розв'язками:

(2.9)

Перетворивши перше рівняння (2.7) отримаємо:

(2.10)

Перетворивши третє рівняння (2.7) отримаємо:

(2.11)

З рівнянь (2.10) - (2.11) отримаємо:

(2.12)

Продиференціювавши друге рівняння (2.7) по φ отримаємо:

(2.13)

З рівнянь (2.12) - (2.13) знаходимо

(2.14)

Позначимо

(2.15)

Тоді рівняння (2.11) перетворюється в лінійне рівняння першого порядку відносно X , тобто:

(2.16)

Права частина рівняння (2.15) знаходиться після розв'язання системи рівнянь (2.8) - (2.13).

Тиск визначаються в чотири етапи:

1. Розв'язання системи рівнянь (2.9) - (2.14).
2. Знаходження правої частини (2.16).
3. Розв'язання рівняння (2.16) та визначення \mathcal{G}_φ ($\mathcal{G}_\varphi = \int X(r, \varphi, Z) dZ$).
4. Знаходження тиску з рівняння:

$$(2.17)$$

Граничні умови для розрахунку тиску в загальному вигляді можна представити в наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dots \\ \dots \\ \dots \end{array} \right. \quad (2.18)$$

де Q - витрата повітря, $\text{м}^3/\text{с}$; a - ширина вхідного патрубку, м ; b - висота вхідного патрубку, м ; H - висота циклонного пиловловлювача, м ; H_0 - висота вихідної труби, м ; d - внутрішній діаметр вихідної труби, м ; α - центральний кут жалюзійного елемента (рисунк. 2.2), рад; $\beta = \frac{\mathcal{G}_\varphi}{\mathcal{G}_r}$ - середнє відношення швидкостей; R_1 - зовнішній радіус вихідної труби, м ; R_2 - радіус внутрішнього корпусу циклонного пиловловлювача, м ;

ψ - коефіцієнт живого перерізу жалюзійного елемента ($\psi = (\text{площа всіх отворів жалюзійної сітки}) / (\text{площа всіх отворів жалюзійної сітки} + \text{площа всіх цільних елементів жалюзійної сітки})$); \mathcal{G}_{ax} - середня вхідна швидкість, м/с.

Розв'язок системи рівнянь (2.10) можна знайти за відомим рівнянням [44]

$$, \quad (2.19)$$

Рисунок 2.2 - Центральний кут жалюзійного елемента

Яке має частковий розв'язок

$$. \quad (2.20)$$

де $\Phi_{\kappa}(r, \varphi, Z)$ - частковий розв'язок відповідного рівняння Гельмгольца.

Звідки отримаємо

$$, \quad (2.21)$$

де $m = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$; k - параметр рівняння Гельмгольца; K - константа, що визначається крайовими умовами; A, B - константи, що визначаються початковими умовами.

Таким чином отримаємо

$$, \tag{2.22}$$

де $J_m(x)$ - функція Бесселя першого роду m -го порядку.

Для визначення колової швидкості будемо апроксимувати радіальну швидкість осьосиметричною функцією. Тоді:

$$\tag{2.23}$$

Після підстановки (2.23) у (2.16) отримаємо:

$$\tag{2.24}$$

Запишемо частковий розв'язок рівняння (2.24)

$$\tag{2.25}$$

$$. \tag{2.26}$$

Після підстановки при $m=0$ отримаємо:

$$, \tag{2.27}$$

$$, \tag{2.28}$$

$$. \tag{2.29}$$

Позначимо:

$$\dots \quad (2.30)$$

Тоді:

$$\dots \quad (2.31)$$

$$\dots \quad (2.32)$$

$$\dots \quad (2.33)$$

Постійні C_1 та C_2 з'явилися після інтегрування спочатку по r , а потім по Z . Тому ці постійні можуть бути будь-якими функціями від φ . В спрощеному вигляді можна прийняти:

$$\dots \quad (2.34)$$

В кінцевому вигляді запишемо колову швидкість:

$$\dots \quad (2.35)$$

Для визначення тисків потрібно знайти $\frac{\partial \mathcal{G}_\varphi}{\partial t}$ та $\Delta \mathcal{G}_\varphi$. Визначимо похідні

Маємо:

$$\frac{\partial \mathcal{G}_\varphi}{\partial t} = -\frac{Ak^2 v J_1(r\sqrt{k^2 + K^2})}{\sqrt{k^2 + K^2}} e^{-K^2 v \pm KZ}, \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \mathcal{G}_\varphi}{\partial r} = -\frac{\varphi Z + B}{r^2} + Ae^{-K^2 v - KZ} \left(\frac{J_1(r\sqrt{k^2 + K^2})}{r\sqrt{k^2 + K^2}} - J_2(r\sqrt{k^2 + K^2}) \right), \quad (2.37)$$

$$\dots \quad (2.38)$$

$$\dots \quad (2.39)$$

$$, \quad (2.40)$$

$$. \quad (2.41)$$

Позначимо:

$$, \quad (2.42)$$

$$, \quad (2.43)$$

$$, \quad (2.44)$$

$$, \quad (2.45)$$

$$, \quad (2.46)$$

$$. \quad (2.47)$$

Тоді:

$$, \quad (2.48)$$

$$, \quad (2.49)$$

$$, \quad (2.50)$$

$$, \quad (2.51)$$

$$, \quad (2.52)$$

$$, \quad (2.53)$$

$$. \quad (2.54)$$

З рівнянь (2.17) та (2.51) отримаємо:

$$, \quad (2.55)$$

$$, \quad (2.56)$$

$$, \quad (2.57)$$

де: a - ширина вхідного патрубку, м; b - висота вхідного патрубку, м;
 H - висота циклонного пиловловлювача, м; H_0 - висота вихідної труби, м; R_1 -

радіус вихідної труби, м; R_2 - радіус внутрішнього корпуса циклонного пиловловлювача, м; ψ - коефіцієнт живого перерізу жалюзійного елемента ($\psi = (\text{площа всіх отворів жалюзійного елемента}) / (\text{площа всіх отворів жалюзійного елемента} + \text{площа всіх цільних елементів жалюзійного елемента})$); g_{ax} - середня вхідна швидкість, м/с; $\beta = \frac{g_\phi}{g_r}$ - середнє відношення швидкостей; Q - витрати повітря, м³/с; α - центральний кут жалюзійного елемента, рад.

Об'єм вловлених частинок складає незначну частину об'єму всередині циклонного пиловловлювача, отже межі потоку від вхідного патрубку до входу у вихідну трубу можна вважати майже постійними. Звідси можна зробити припущення про стаціонарність поля швидкості, що дає змогу спростити систему (2.6):

$$\left. \begin{aligned} & , \\ & , \\ & . \end{aligned} \right\} \quad (2.58)$$

Прирівнявши $k = 0$ рівняння (2.35) можна записати в наступному вигляді:

$$, \quad (2.59)$$

$$R_1 < r < R_2 .$$

Запишемо граничні умови колової швидкості для застосування метода колокацій [37]:

- середина жалюзійної ділянки;
- нижній край внутрішнього циліндричного корпусу циклонного пиловловлювача;
- торець вихідної труби.

В цих точках $\mathcal{G}_\varphi(\mu_1) = \psi \mathcal{G}_{ex}$; $\mathcal{G}_\varphi(\mu_2) = \mathcal{G}_\varphi(\mu_3) = 0$

Для знаходження постійних A , B и K запишемо три рівняння:

$$, \quad (2.60)$$

$$, \quad (2.61)$$

$$. \quad (2.62)$$

З другого та третього рівняння (2.61 - 2.62) знайдемо

$$. \quad (2.63)$$

Знайшовши K з рівняння (2.63) можна записати систему для визначення A та B з перших двох рівнянь (2.60 - 2.61):

$$, \quad (2.64)$$

.

Розв'язуючи систему рівнянь (2.64) відносно A та B , отримаємо:

$$, \quad (2.65)$$

$$. \quad (2.66)$$

Знаючи A , B та K за формулою (2.56) можна розрахувати тиск [37]:

$$. \quad (2.67)$$

Звідки можна розрахувати падіння тиску від вхідного патрубку до торця вихідної труби за формулою:

$$\dots \quad (2.68)$$

де $P = f(r, \varphi, Z)$ визначається за формулою (2.67).

Падіння тиску в вихідній трубці визначається:

$$\dots \quad (2.69)$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя λ в вихідній трубці визначається за формулою:

$$\dots \quad (2.70)$$

Для визначення коефіцієнту гідравлічного тертя потрібно знати число Рейнольдса, для розрахунку якого потрібно знати визначальний розмір.

Визначимо три напрямних потоки, кожен з яких має свій поперечний переріз. В напрямку колової швидкості площа поперечного перерізу дорівнює половині осьового перерізу, тобто:

$$\dots \quad (2.71)$$

Звідки:

$$\dots \quad (2.72)$$

$$\dots \quad (2.73)$$

В напрямку осьової швидкості:

$$\dots \quad (2.74)$$

Звідки:

$$\dots \quad (2.75)$$

В напрямку радіальної швидкості:

$$\dots \quad (2.76)$$

$$\dots \quad (2.77)$$

Середньоарифметичну площа можна розрахувати за формулою:

$$\dots \quad (2.78)$$

$$\dots \quad (2.79)$$

Середня швидкість газового потоку в об'ємі циклонного пиловловлювача дорівнює

$$\dots \quad (2.80)$$

Середньоквадратичний визначальний розмір буде дорівнювати:

$$a_0 = \sqrt{\frac{a_r^2 + a_\varphi^2 + a_z^2}{3}}, \quad (2.81)$$

$$a_0 = \sqrt{\frac{1}{3} \left(HR_1 + \frac{HR_1}{\pi} + R_1^2 \right)}, \quad (2.82)$$

$$a_0 = \sqrt{\frac{H}{3} \left(R_1 + \frac{R_1}{\pi} + \frac{R_1^2}{H} \right)}, \quad (2.83)$$

$$a_0 = \sqrt{\frac{S_0}{\pi}}. \quad (2.84)$$

Звідки і знайдемо число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{a_0 \mathcal{G}_{ax}}{\nu} = \sqrt{\frac{S_0}{\pi}} \cdot \frac{Q}{S_0} \cdot \frac{1}{\nu} = \frac{Q}{\pi \nu \sqrt{S_0}}, \quad (2.85)$$

$$\text{Re} = \frac{Q\sqrt{3}}{\pi \nu \sqrt{\pi H \left(R_1 + \frac{R_1}{\pi} + \frac{R_1^2}{H} \right)}}. \quad (2.86)$$

Загальний аеродинамічний опір циклонного пиловловлювача розраховується за формулою [37]

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (2.87)$$

Алгоритм розрахунку аеродинамічного опору циклонного пиловловлювача представлений на рисунку 2.3

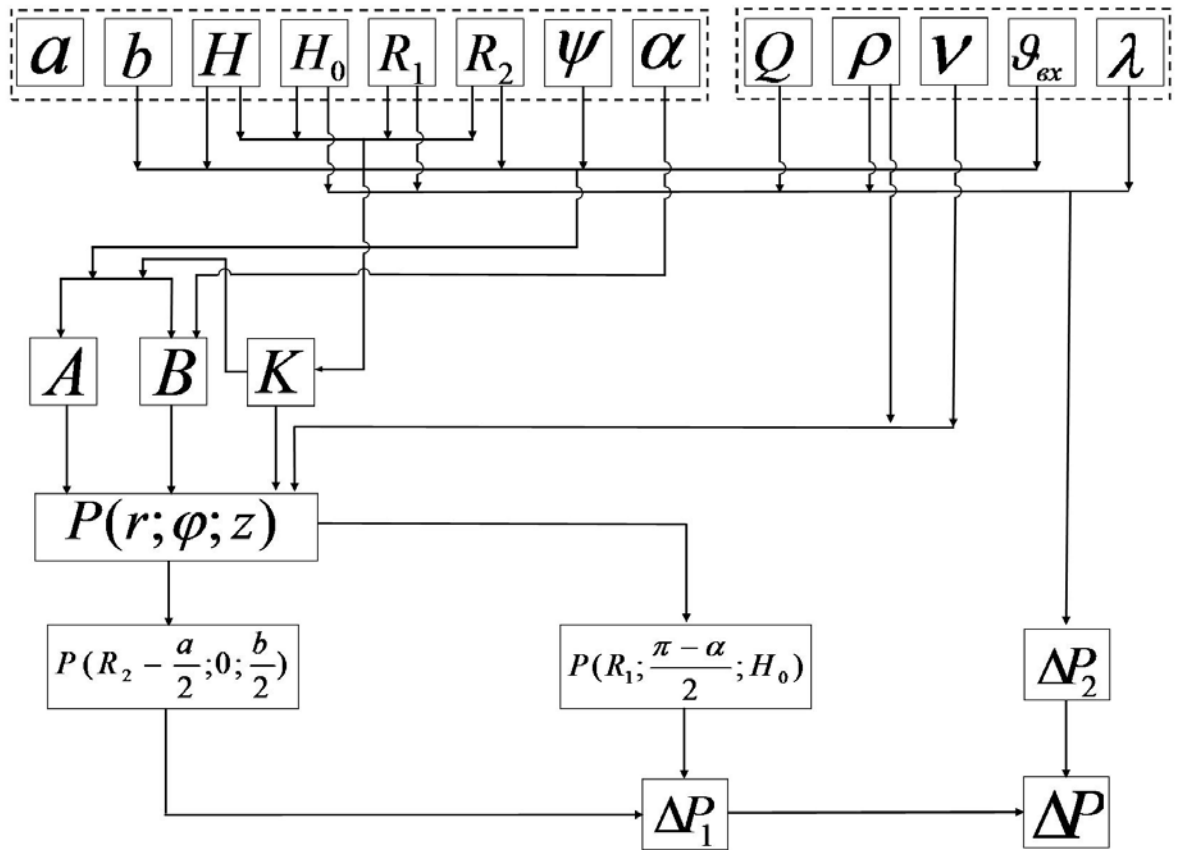


Рисунок 2.3 - Алгоритм розрахунку аеродинамічного опору
циклонногопиловловлювача

Аеродинамічний коефіцієнт опору циклонного пиловловлювача розраховується за формулою

$$\xi = \frac{2\Delta P}{v^2 \rho_2} \quad (2.88)$$

2.3 Розрахунок ефективності вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі

Фракційна ефективність вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі розраховується за формулою [37]

$$\eta(\delta) = nStk^m K^l, \quad (2.89)$$

де: $Stk = \frac{d_p^2 v_n \rho_p}{D \mu}$; ρ_p - густина частинки, кг/м³; D - діаметр апарата, м;

μ - динамічна в'язкість повітря, Па·с; v_n - швидкість в перетині апарата, м/с);

$K = \frac{C}{P_p}$ (C - концентрація частинок в пилогазовій суміші, кг/м³);

n, m, l - безрозмірні коефіцієнти, що визначаються експериментальним шляхом.

Повна ефективність циклонного пиловловлювача

(2.90)

де $\varphi(\delta)$ - густина вірогідності розподілу розмірів частинок пилу [45].

Алгоритм розрахунку ефективності вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі представлений на рисунку 2.4

Рисунок 2.4 - Алгоритм розрахунку ефективності вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі

Розрахуємо ймовірність потрапляння частинки певного розміру у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача [37].

На кордоні сполучення плоскої стінки вхідного патрубку і циліндричної стінки жалюзійної поверхні розташовано поперечний переріз вхідного потоку, у якого ширина дорівнює a , висота - b . Якщо R_1 - зовнішній радіус вихідної труби, а R_2 - радіус внутрішнього корпусу циклонного пиловловлювача, то середня осьова швидкість газового потоку у внутрішньому циліндричному корпусі циклонного пиловловлювача в області між верхньою кришкою та нижнім рівнем жалюзійного елемента дорівнює

$$\dots \quad (2.91)$$

Середня колова швидкість газового потоку в області, обмеженою жалюзійним елементом, дорівнює

$$\dots \quad (2.92)$$

Середня радіальна швидкість частки в області, обмеженою жалюзійним елементом, дорівнює

(2.93)

де: $\bar{\delta}^2$ - середній квадрат діаметра частинки; ν - кінематична в'язкість повітря; c - безрозмірний коефіцієнт, що залежить від концентрації частинок пилу в потоці.

Частинка з діаметром δ , що має початкові координати: $r_0 (R_1 < r_0 < R_2)$, $\varphi_0 = 0$, $Z_0 (0 < Z_0 < b)$, за час τ отримає нові координати: $r_\tau = r_0 + \mathcal{G}_r \tau_r$; $Z_\tau = \mathcal{G}_z \tau_z$;

$$\varphi_\tau = \frac{\mathcal{G}_\varphi \tau_\varphi}{R_1 + R_2}.$$

Для того, щоб частинка потрапила на поверхню жалюзійного елемента, необхідно виконання нерівностей $r_0 + \mathcal{G}_r \tau_r > R_2$; $\mathcal{G}_z \tau_z < b$; $\frac{\mathcal{G}_\varphi \tau_\varphi}{R_1 + R_2} < \alpha$.

Звідси знаходимо;

Так як $\min r_0 = R_1$, то $\tau_r = \frac{R_2 - R_1}{\mathcal{G}_r}$.

Запишемо початкові координати частинки, яка досягає жалюзійного елемента циклонного пиловловлювача:

(2.94)

Ймовірність потрапляння частинки на поверхню жалюзійного елемента циклонного пиловловлювача дорівнює

(2.95)

Ймовірність потрапляння частинки всередину зовнішнього корпусу циклонного пиловловлювача за умови, що вона знаходиться на поверхні жалюзійного елемента, дорівнює

(2.96)

Ця рівність пояснюється тим, що жалюзійний елемент обмежує застійну зону, на межі якої відбуваються пульсації швидкостей, що рівноімовірні по амплітуді і знаку.

По теоремі множення ймовірно залежних подій знаходимо ймовірність осідання частинок усередині зовнішнього корпусу циклонного пиловловлювача

(2.97)

Алгоритм розрахунку ймовірності потрапляння частинки певного розміру у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача представлений на рисунку 2.5

Рисунок 2.5 - Алгоритм розрахунку ймовірності потрапляння частинки певного розміру у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача

2.4 Алгоритм розрахунку циклонного пиловловлювача

Для розрахунку циклонного пиловловлювача необхідні такі вихідні дані:

- об'єм очисного газу при робочих умовах Q , м³/с;
- густина газу при робочих умовах ρ_z , кг/м³;
- динамічна в'язкість газу при робочій температурі μ , Па·с;
- запиленість газу C , кг/м³;
- густина частинок ρ_c , кг/м³;
- медіанній діаметр частинок d_m , мкм;
- необхідна ефективність очистки газу η .

Розрахунок циклонного пиловловлювача проводиться в наступній послідовності.

Задаємо оптимальною швидкістю газу в перетині апарату $\omega_{\text{опт}}$ (3 м/с).

Розраховуємо необхідну площу перетину апарата, м²

(2.98)

Розраховуємо діаметр внутрішнього корпусу апарата, м

(2.99)

Діаметр внутрішнього корпусу апарата округлюємо до величини, вказаній в таблиці по компоновці циклонів ЦН в групі

Розраховуємо дійсну швидкість газу в перетині апарата, м/с

(2.100)

Швидкість газу в апараті не повинна відхилитися від оптимальної більш ніж на 15%.

Визначившись з діаметром внутрішнього корпусу апарата розраховуємо основні його конструктивні габарити:

- внутрішній діаметр зовнішнього корпусу, м

(2.101)

- внутрішній діаметр вихідної труби, м

- (2.102)
- внутрішній діаметр пиловипускного отвору, м (2.103)
 - ширина вхідного патрубку в циклоні (Внутрішній розмір), м (2.104)
 - ширина вхідного патрубку на вході (Внутрішній розмір), м (2.105)
 - довжина вхідного патрубку, м (2.106)
 - висота вхідного патрубку (внутрішній діаметр), м (2.107)
 - кут розкриття жалюзійного елемента, град (2.108)
- висота вихідної труби, м (2.109)
- висота циліндричної частини внутрішнього корпусу апарата, м (2.110)
 - висота конуса апарата, м (2.111)
 - висота зовнішньої частини вихідної труби, м (2.112)
 - загальна висота апарата без бункера-накопичувача, м (2.113)

Розраховуємо коефіцієнт гідравлічного тертя:

(2.114)

Розраховуємо втрати тиску в апараті, Па

(2.115)

(2.116)

(2.117)

(2.118)

Якщо втрати тиску ΔP виявились задовільними, переходимо до розрахунку повного коефіцієнта очистки газу в апараті

(2.119)

(2.120)

(2.121)

Висота зовнішнього корпусу може бути різною і залежить від особливостей проектованої конструкції апарата.

2.5 Результати розрахунків за математичною моделлю

Аеродинамічний опір циклонного розраховувалися для апарата діаметром 170 мм, при нормальних умовах ($t=20$ °С, $\rho_{п}= 1,2$ кг/м³). Ефективність вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі розраховувалися для апарата діаметром 170 мм, при різних температурах газового потоку ($t = 20...100$ °С). В якості пилу було взято цементний пил ($\rho= 3160$ кг/м³). Основні геометричні розміри циклонного пиловловлювача розраховувалися за формулами, приведеними в Додатку Б.

За результатами математичного моделювання були отримані залежності аеродинамічного опору апарата (рисунок 2.6) та повної ефективності вловлювання (рисунок 2.7) від швидкості в перетині апарата.

Рисунок 2.6 - Залежність аеродинамічного опору апарата від швидкостей перетині апарата

1 - $t = 20^{\circ}\text{C}$; 2 - $t = 40^{\circ}\text{C}$; 3 - $t = 60^{\circ}\text{C}$; 4 - $t = 80^{\circ}\text{C}$; 5 - $t = 100^{\circ}\text{C}$

Рисунок 2.7 - Залежність повної ефективності вловлювання від швидкості в перетині апарата при різних температурах газового потоку

Також отримали залежність фракційної ефективності вловлювання цементного пилу від медіанного діаметра частинок для різних швидкостей в перетині апарата (рисунок 2.8). Була отримана залежність фракційної ефективності вловлювання цементного пилу від медіанного діаметра частинок для різних діаметрів внутрішнього корпусу апарата(рисунок 2.9) та ймовірність потрапляння частинки певного розміру у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача (рисунок 2.10).

1 - $v = 1$ м/с; 2 - $v = 2$ м/с; 3 - $v = 3$ м/с; 4 - $v = 4$ м/с

Рисунок 2.8 - Залежність фракційної ефективності вловлювання від медіанного діаметра частинок пилу

1 - $D = 0.2$ м; 2 - $D = 0.4$ м; 3 - $D = 0.6$ м; 4 - $D = 0.8$ м; 5 - $D = 1.0$ м

Рисунок 2.9 - Залежність фракційної ефективності вловлювання від медіанного діаметра частинок пилу для різних діаметрів внутрішнього корпусу апарата
(для швидкості в перетині апарата $v = 3$ м/с)

1 - $R_I = 0.076$ м; 2 - $R_I = 0.080$ м; 3 - $R_I = 0.084$ м

Рисунок 2.10- Ймовірність потрапляння частинок певного діаметра у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача

2.6 Висновки до розділу

1. Сформульовано фізичну модель процесу очистки неоднорідних газових систем в циклофільтрі.
2. Розроблено математичну модель процесу очистки димових та технологічних газів від золи та пилу в циклонному пиловловлювачі, яка враховує вплив жалюзійного елемента на аеродинаміку та ефективність апарата.
3. За результатами математичного моделювання процесу очистки димових та технологічних газів від золи та пилу в циклонному пиловловлювачі було встановлено залежність фракційної ефективності вловлювання від медіанного діаметра частинок для різних значень швидкості газового потоку в перетині апарата, яка описується параболічним законом зростання фракційної ефективності вловлювання твердих частинок зі збільшенням їх медіанного діаметру незалежно від швидкості газового потоку в перетині апарата.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

При проектуванні нових високоефективних циклонів необхідно використовувати останні досягнення фундаментальних і прикладних наук, високі технології проектування і виробництва в області газодинамічних досліджень процесів очистки неоднорідних газових систем в полі відцентрових сил.

Аналіз літературних джерел у розділі 1, в тому числі [46-48], пов'язаних з сухою очисткою газу від твердих частинок, показав, що дослідники, що займаються розробкою нових конструкцій пиловловлюючих пристроїв, використовують нетрадиційні рішення, що включають в себе установку внутрішніх фільтруючих елементів в середину пиловловлюючих апаратів. Недостатність інформації по новим технічним способам і конструкціям дає право розглядати запропоновані рішення, як наприклад в [46-48], напрямок експериментальних і модельних досліджень з метою розуміння фізичного механізму процесів сепарації в циклонних апаратах з внутрішніми елементами та їх оптимізація. Оптимізація процесів пилоочищення повинна бути спрямована на отримання гармонійного співвідношення величин ступеня вловлювання дисперсного пилу і гідравлічних втрат газоочисного обладнання.

Існуючі інженерні методики до розрахунку пиловловлюючого обладнання базуються на напівемпіричних рівняннях подібності та інтегральних методах. Використання обчислювальних технологій, що реалізуються в спеціалізованих обчислювальних пакетах програмного забезпечення, дозволяють розраховувати з прийнятною для практики точністю масообміні та гідродинамічні характеристики в турбулентних просторових стаціонарних та нестаціонарних вихрових потоках в областях складної геометрії.

У цьому розділі представлені результати модельних досліджень газодинамічних структур течії в пиловловлювачах з внутрішнім жалюзійним елементом та зовнішнім бункером і традиційної конструкції типу НДІОГАЗ [49-

50]. Також наведені результати дослідження характеру руху твердих частинок різного медіанного діаметру в запиленому потоці [51].

Для розрахунків використовувався сучасний програмний CFD (Computational Fluid Dynamics - обчислювальна гідрогазодинаміка) комплекс. Комплекс програм призначений для твердотільного трьохвимірного проектування, а також для оцінки масообмінних, теплових та аеродинамічних процесів.

Комплекс дозволяє розраховувати просторові стаціонарні і нестаціонарні течії рідини і газу, ламінарні і турбулентні течії, течії в пористих середовищах, конвективний, радіаційний теплообмін і теплопровідність, рух дисперсної фази в несучому потоці (тверді частинки, краплі), течії з об'ємними силами (гравітаційні й електромагнітні поля). У комплексі програм реалізовані просторові моделі на базі методів обчислювальної гідродинаміки, моделі розподілення потоків на базі мережевих методів, інтегральні і комплексні моделі, що поєднують можливості перерахованих вище моделей. Є докладна і ефективна система графічної візуалізації результатів розрахунку. Використання комплексу програм дозволяє проводити розрахунки аерогідродинаміки та тепломасообміну на стадії розробки і проектування промислових пристроїв, дозволяючи уникнути необхідності коштовних натурних випробувань.

3.1 Моделювання аеродинамічних процесів пиловловлювачів

Задана геометрія двох пиловловлювачів: обидва апарати спроектовані за конструктивними розмірами циклона ЦН-15 з кутом нахилу вхідного патрубку 0° , але один з апаратів (циклонний пиловловлювач) має конструктивні зміни у вигляді жалюзійного елемента та додаткового зовнішнього корпусу.

На рисунку 3.1 зображено пиловловлювач з внутрішнім жалюзійним елементом та традиційний циклон конструкції типу НДЮГАЗ.

Діаметр внутрішнього корпусу циклонного пиловловлювача
170 мм.

а

б

а - конструкція №1 (циклон з внутрішнім жалюзійним елементом та зовнішнім бункером); б - конструкція №2 (циклон, за конструктивними розмірами подібний циклона ЦН-15, але має кут нахилу вхідного патрубку 0^0)

Рисунок 3.1 - Геометричні розміри пиловловлювачів

Загальний аксонометричний вигляд двох пиловловлювачів представлено на рисунку 3.2. При моделюванні газодинамічної структури течії та аеродинамічного опору апаратів геометрія була однаковою з циклонами, на яких проведено експериментальні дослідження ефективності пиловловлювання та аеродинаміки.

а, б - загальний аксонометричний вигляд з розташуванням перерізів конструкції №1 та №2 відповідно; в, г - розташування відрізків конструкції №1 та №2 відповідно

Рисунок 3.2 - Загальний аксонометричний вигляд пиловловлювачів з розташуванням перерізів та відрізків

Для пиловловлювачів проведена серія розрахунків турбулентної течії газу. Розташування відрізків та перерізів по висоті апарата, в яких проводилися розрахунки, показані на рисунках 3.2 та 3.3

а - загальний аксонометричний вигляд розташуванням перерізів конструкції №1; б - розташування відрізків конструкції №1

Рисунок 3.3 - Загальний аксонометричний вигляд циклонного пиловловлювача з розташуванням перерізів та відрізків

Для моделювання течії використовувався сучасний програмний комплекс, в якому застосовується фізична модель руху текучого середовища - рівняння Нав'є-Стокса, яке у загальній векторній формі має вигляд [52]:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \nabla P$$
(3.1)

де \vec{v} - вектор швидкості повітря, м/с; \vec{F} - вектор масової сили; ρ - густина повітря, кг/м³; P - тиск повітря у будь-якій точці, Па; ν - кінематична в'язкість повітря, м²/с.

Рівняння Нав'є-Стокса описують в нестационарній постановці закони збереження маси, імпульсу та енергії цього середовища. Цими рівняннями модулюються турбулентні, ламінарні та перехідні течії. Для моделювання турбулентних течій рівняння Нав'є-Стокса усереднюються за Рейнольдсом, тобто використовується середній за малим масштабом часу вплив турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні тимчасові зміни середніх за малим масштабом часу складових газодинамічних параметрів потоку (тиску, швидкостей, температури) враховуються введенням відповідних похідних за часом.

В результаті рівняння отримують додаткові члени - напруження за Рейнольдсом, а для замикання цієї системи рівнянь використовуються рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності і її дисипації в рамках k - ϵ моделі турбулентності.

Ця система рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії нестационарної просторової течії має наступний вигляд в рамках підходу Ейлера в декартовій системі координат $(x_i, i=1, 2, 3)$, що обертається з кутовою швидкістю Ω навколо осі, що проходить через її початок [52]:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{\Omega} \times \vec{r} \cdot \nabla$$
(3.2)

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{\Omega} \times \vec{r} \cdot \nabla$$
(3.3)

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{\Omega} \times \vec{r} \cdot \nabla$$
(3.4)

де: t - час, с; u - швидкість текучого середовища, м/с; ρ - густина текучого середовища, кг/м³; P - тиск текучого середовища, Па.

$$, \quad (3.5)$$

де: S_i - зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу текучого середовища; $S_{iporous}$ - вплив опору пористого тіла; $S_{igravity}$ - вплив сили гравітації; $S_{irotation}$ - вплив обертання системи координат.

Кінетична енергія турбулентності k і дисипація цієї енергії ϵ визначаються в результаті розв'язання наступних двох рівнянь[52]:

$$, \quad (3.6)$$

$$, \quad (3.7)$$

де:

$$, \quad (3.8)$$

$$, \quad (3.9)$$

$$, \quad (3.10)$$

де g_i - складова гравітаційного прискорення в координатному напрямку x_i , $\sigma_B = 0.9$, $C_B = 1$ при $P_B > 0$ и $C_B = 0$ при $P_B \leq 0$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$,

$$\sigma_\epsilon = 1.3, \quad f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu} \right)^3, \quad f_2 = 1 - \exp(-R_T^2).$$

Вплив сил гравітації моделюється за допомогою складової $S_{igravity}$, яка входить до сумарної масової сили (3.5) в рівняння (3.3, 3.4) [52]

$$\vec{g} = (g_1, g_2, g_3), \quad (3.11)$$

де g_i — i -та складова (вздовж i -ї вісі системи координат) вектора гравітаційного прискорення.

Для знаходження шуканого чисельного розв'язку задачі безперервна нестационарна математична модель фізичних процесів дискретизується як в просторі, так і за часом. Щоб виконати дискретизацію в просторі, вся розрахункова область циклонного пиловловлювача, зайнята текучим середовищем (повітрям), покривається розрахунковою сіткою, грані комірок якої паралельні координатним площинам X , Y і Z . Для пиловловлювачів багатоблочна структурована сітка будувалася шляхом розбиття об'єму апаратів за віссю Ox - 20-ма, Oz - 20-ма, Oy - 60-ма площинами. При розрахунку поведінки текучого середовища в обмеженій стінками моделі області, використовується так званий метод фіктивних областей, тобто формально розрахункова сітка будується в паралелепіпедоподібній області, яка покриває модель з текучим середовищем всередині. Але розрахунки проводяться тільки в комірках, що потрапили в розрахункову область, тобто в простір, заповнений відповідно до постановки задачі поточним середовищем. Оскільки грані розрахункових комірок не апроксимують дотичні з текучим середовищем поверхні твердих тіл, то на криволінійних ділянках циклонного пиловловлювача ми використали локальне дроблення комірок сітки близько до цих ділянок поверхні. В нашому випадку критерій дроблення комірок, пов'язаний з кривизною поверхні, склав два, тобто комірки, що знаходяться біля криволінійних поверхонь обичайок циклонного пиловловлювача, ділилися на два. В кінцевому результаті побудови сітки було отримано 2155238 та 872967 комірок для конструкцій апаратів №1 та №2 відповідно (рисунок 3.4).

В якості граничних умов на вході задавалися витрати повітря $Q_{\text{вх}}$, м³/год, температура газового потоку t , °С, а на виході задавався статичний тиск $P_{\text{ст.вих}}$, МПа. Прилипання частинок пилу відбувається на дні внутрішнього і зовнішнього бункерів, відбивання частинок пилу відбувається від стінок циклонного пиловловлювача, причому кут падіння дорівнює куту відбиття.

Вихідні умови до розрахунків наведено в таблиці 3.1.

а, б - фронтальний вигляд конструкції №1 та №2 відповідно;
в, г - вигляд зверху конструкції №1 та №2 відповідно

Рисунок 3.4 - Розрахункова багатоблочна сітка

Таблиця 3.1 - Вихідні умови до розрахунків

№ розрахунку	$Q_{\text{вх}}$, м ³ /год	v , м/с	t , °С	ρ , кг/м ³	$\mu \cdot 10^{-5}$, Па*с	$P_{\text{ст.вих}}$, МПа
1	81,67	1	20	1,2	1,82	0,1
2	163,34	2	20	1,2	1,82	0,1
3	245,01	3	20	1,2	1,82	0,1
4	326,69	4	20	1,2	1,82	0,1

На ефективність пиловловлення значно впливає розподіл тиску і швидкості як у поздовжньому, так і в поперечному перерізі циклона.

Результати числового аналізу №3 статичного тиску в поздовжньому та поперечному перерізах у вигляді полів наведено на рисунку 3.5.

а, б - повздовжній переріз циклонного пиловловлювача та циклона відповідно; в, г - поперечний переріз циклонного пиловловлювача та циклона відповідно

Рисунок 3.5 - Поля розподілу статичного тиску в апараті

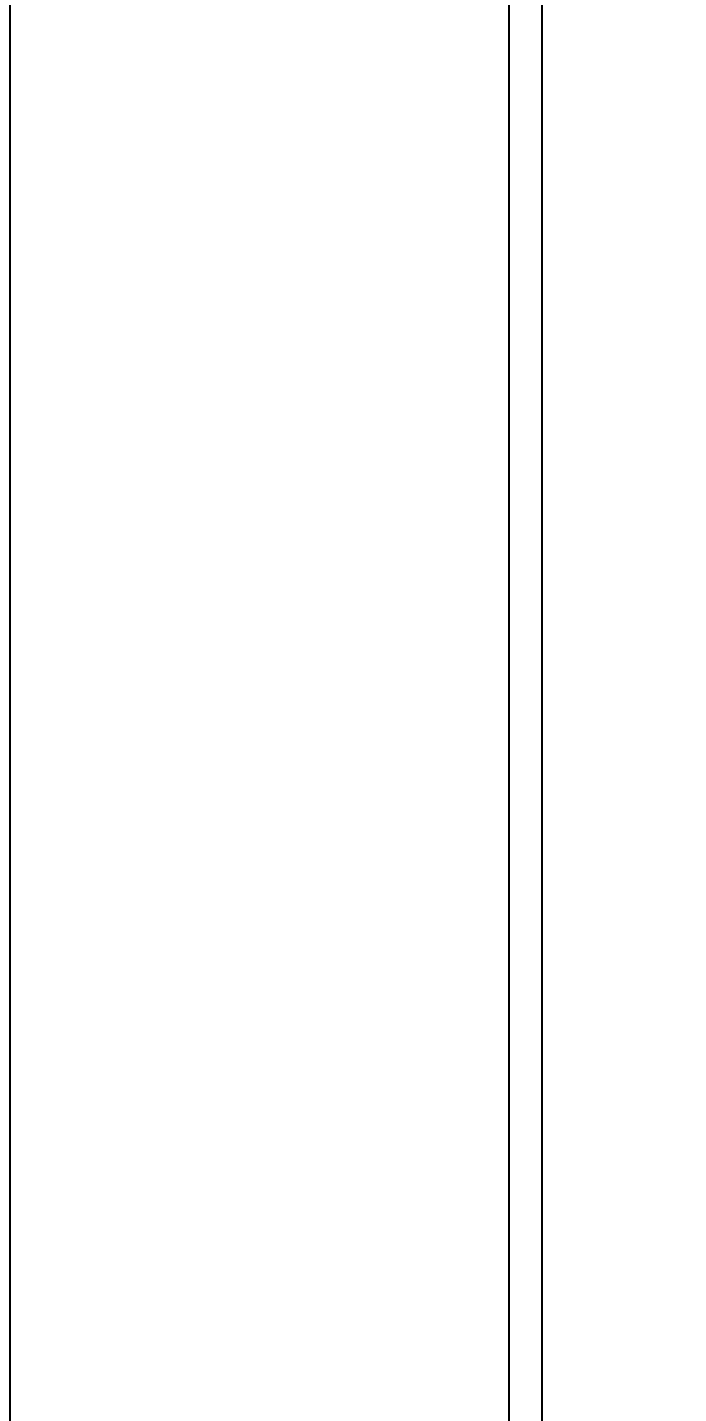
Характер руху газового потоку в першій чверті циліндричної частини циклонного пиловловлювача значно відрізняється від типового циклона НДІОГАЗ у зв'язку з наявністю жалюзійного елемента, що турбулізує потік. На рисунку 3.5 наведено результати розрахунку статичного тиску в циклонному пиловловлювачі та типовому циклоні у вигляді полів в повздовжньому (Рисунок 3.5 а, б) та поперечному (рисунок 3.5 в, г) перерізах. Поперечний переріз розташований на висоті 0,67 м від початку координат.

З рисунку 3.5 бачимо, що в циклонному пиловловлювачі довжина повітряного джгута на 25% більша, аніж у циклоні, що свідчить про більш інтенсивне обертання потоку в зоні вихідної труби. Однак, з вигляду зверху (рисунок 3.5 в), можна побачити, що в циклонному пиловловлювачі в поперечному перерізі має місце більш рівномірно розподілений статичний тиск, на відміну від аналогічного в циклоні (рисунок 3.5 г). Середнє значення статичного тиску в наведеному перерізі для циклонного пиловловлювача складає приблизно 102204 Па, а в циклоні помітно зони підвищеного тиску в третій та четвертій чвертях діаметру циліндричної частини апарата. Перепад значень статичного тиску в наведеній площині для циклона досягає 200 Па. Відносно рівномірний розподіл статичного тиску в циклонному пиловловлювачі

можна пояснити наявністю більшої площі поперечного перерізу апарата, по якій відбувається розподіл тиску.

Для більш чіткого представлення картини розподілу статичного тиску в циклонному пиловловлювачі та циклоні були проведені додаткові розрахунки в поперечних перерізах в області жалюзійного елемента по висоті вхідного патрубку ($Y = 0.62$ м, $Y = 0.67$ м та $Y = 0.72$ м). Результати цих розрахунків представлені на рисунку 3.6.

Представлені поля тисків в поперечних перерізах на рисунку 3.6 для досліджуваних пиловловлювачів говорять про рівномірний розподіл тиску вздовж аналізованої області розподілу тиску в циклоні (рисунок 3.6 б, г, е) та більш низькому та нерівномірному розподілу тиску в циклонному пиловловлювачі (рисунок 3.6 а, в, д).



а, в, д - поперечний переріз циклонного пиловловлювача на висоті $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м від початку координат відповідно; б, г, е - поперечний переріз циклона на висоті $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м від початку координат відповідно

Рисунок 3.6- Поля розподілу статичного тиску в перерізах циклонного пиловловлювача та циклона

Необхідно звернути увагу на результати розрахунків циклонного пиловловлювача. В пристінній області жалюзійного елемента спостерігаються зони зниженого тиску, що спричинює утворення вихрів. Цесприяє покращенню сепарації дрібних частинок пилу з основного потоку в зони розрядження та віднесення цих частинок у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача.

Результати числового аналізу №3 модуля швидкості в поздовжньому та поперечному перерізах у вигляді полів наведено на рисунку 3.7

Наведені поля модуля швидкості (рисунок 3.7) розраховані відносно швидкості у вхідному патрубку. Аналіз показує, що в поздовжньому перерізі швидкості руху потоку (16...17 м/с) в пристінній області циліндричної та конічної частини у циклонного пиловловлювача та циклона мають схожий характер (рисунок 3.7 а, б). Однак при більш детальному аналізі зони стикування циліндричної частини з конічною помітно більш різку зміну швидкості в циклонному пиловловлювачі (з 20 м/с на 25 м/с) на відміну від циклона (з 23 м/с на 25 м/с), в аналогічній зоні якого профіль швидкості має рівномірний характер, що свідчить про вірогідність утворення джгутів пилу наприкінці циліндричної частини циклона.

В першій чверті діаметра циліндричної частини поперечного перерізу циклонного пиловловлювача (рисунок 3.7 в) помітно зону підвищеної швидкості (30 м/с), що за розміром та числовим значенням більша за аналогічну в циклоні (27 м/с), що свідчить про інтенсивніше обертання потоку в циклонного пиловловлювачі в наведеному перерізі. Наявність зон низької швидкості в пристінній області жалюзійного елемента вказує на вірогідне утворення вихрових зон, які турбулізують потік та збільшують вірогідність потрапляння твердих частинок в зовнішній ізольований бункер. Також необхідно відмітити майже повну ідентичність внутрішнього висхідного потоку в конічній частині та вихідній трубі циклонного пиловловлювача та циклона в поздовжньому перерізі (рисунок 3.7 а, б).

а, б- повздовжній переріз циклонного пиловловлювача та циклона відповідно; в, г- поперечний переріз циклонного пиловловлювача та циклона відповідно

Рисунок 3.7 - Поля розподілу модуля швидкості в апараті

Результати розрахунку №3 тангенціальних та аксіальних складових швидкості потоку в циліндричній частині циклонного пиловловлювача та циклона наведено на рисунках 3.8 та 3.9. Розрахунки проводилися вздовж відрізків 1, 2, 3 (рисунок 3.2 в-г), що розташовані в двох перерізах (рисунок 3.2, а-б) на висоті $Y=0,72$ та $Y=0,62$ м. від початку координат. Ці перерізи обиралися, виходячи з висоти вхідного патрубку, а відрізки, вздовж яких розраховувалися швидкості, відповідають початку, середині та кінцю жалюзійного елемента.

Також були проведені розрахунки тангенціальної складової швидкості потоку в циліндричній частині внутрішнього та зовнішнього корпусів циклонного пиловловлювача. Результати розрахунку представлені на рисунку 3.10. Розрахунки проводилися вздовж дуг 1 - 6 (рисунок 3.3б), що розташовані в трьох перерізах $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м від початку координат. Дуги, вздовж яких розраховувалися швидкості, розташовані в пристінній області і мають радіуси $R = 0.076$ м, $R = 0.080$ м, $R = 0.084$ м, $R = 0.087$ м, $R = 0.091$ м та $R = 0.095$ м та довжину, яка відповідає довжині дуги, що описує область розкриття жалюзійного елемента.

На наведених графіках по вісі Y відкладена швидкість, а по вісі X безрозмірна відстань r/R (рисунки 3.8 та 3.9) та l/L (рисунок 3.10), де R - відстань від зовнішньої межі вихідної труби до периферійної стінки циклона, r - поточна відстань від зовнішньої межі вихідної труби та L - довжина дуги від початку жалюзійного елемента до його кінця, l - поточна довжина дуги відповідно. При розрахунку аксіальної складової швидкості (рисунки 3.8 б, г, е та 3.9 б, г, е) додатнім напрямом було прийнято рух вгору вздовж вісі Y . Метою розрахунків було визначення загальної картини та профілю швидкості для конкретизації впливу жалюзійного елемента на процес вловлювання твердих частинок пилу в цілому.

З наведених результатів розрахунку (рисунки 3.8 а та 3.9 а) бачимо, що профіль тангенціальної складової швидкості на початку жалюзійного елемента в циклонному пиловловлювачі (відрізок 1) аналогічний профілю

а, в, д - профіль тангенціальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3 відповідно; б, г, е- профіль аксіальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3 відповідно

Рисунок 3.8 - Профілі тангенціальної та аксіальної складових швидкостей вциклоні(1) та циклонному пиловловлювачі (2) в перерізі $Y=0,72$ м.

а, в, д - профіль тангенціальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3 відповідно; б, г, е - профіль аксіальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3 відповідно

Рисунок 3.9 - Профілі тангенціальної та аксіальної складових швидкостей вциклоні(1) та циклонному пиловловлювачі (2) в перерізі $Y=0,62$ м

а, в, д - профіль тангенціальної складової швидкості в циклонному пиловловлювачі по довжині дуг 1, 2 та 3 відповідно в перерізах $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м відповідно; б, г, е - профіль тангенціальної складової швидкості в циклонному пиловловлювачі по довжині дуг 4, 5 та 6 відповідно в перерізах $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м відповідно

Рисунок 3.10- Профілі тангенціальної складової швидкості в циклонному пиловловлювачі

тангенціальної складової швидкості в типовому циклоні в обох наведених перерізах. Однак, відрізок 2, що відповідає середині жалюзійного елемента в циклонному пиловловлювачі, має профіль тангенціальної складової швидкості, що значно відрізняється від аналогічної ділянки в типовому циклоні. В циклонному пиловловлювачі спостерігається стрімке зростання тангенціальної складової швидкості від 10 до 30 м/с, в той час як в типовому циклоні спостерігається переважно спадання наведеної швидкості по довжині відрізків 2 та 3 (рисунки 3.8 в, д, та 3.9 в, д) в наведених перерізах.

Точки перетину графіків розподілення тангенціальних складових швидкостей, що знаходяться посередині відрізків 2 та 3, можна пояснити наявністю вихрових зон, які виникають біля жалюзійних вікон в циклонному пиловловлювачі. Вивчення інтенсивності вихорів та турбулентних характеристик цих вихорів потребує виконання додаткових досліджень. Однак, внесок наведених вихрових зон в загальну аеродинамічну картину течії газу в першій чверті циклонного пиловловлювача призводить до збільшення тангенціальної складової швидкості потоку, що в свою чергу призводить до підвищення ефективності вловлювання твердих частинок в апараті.

Профілі аксіальної складової швидкості потоку в циклонному пиловловлювачі та типовому циклоні подібні профілю тангенціальної складової швидкості, проте відрізняються чисельно через характер їх спрямованості. Так, якщо відрізок 1 (рисунки 3.8 б, та 3.9 б) в обох площинах має схожий характер, то відрізки 2 та 3 (рисунки 3.8 г, е, та 3.9 г, е) вже на відстані у $0,4 \cdot R$ мають переважно протилежну спрямованість. В перерізах 0,62 та 0,72 м. бачимо, що максимуми аксіальної складової швидкості в циклоні вздовж відрізків 2 та 3 знаходяться ближче до стінок вихідної труби. Відомо, що вторинні токи, які виникають вздовж поверхні вихідної труби несуть чималу частину пилу, тим самим зменшують ефективність типового циклона. Натомість в циклонному пиловловлювачі в перерізах 0,62 та 0,72 м вздовж відрізків 2 та 3 зони максимуму аксіальної складової швидкості спостерігаються ближче до периферійної стінки

циліндричної частини. Значення швидкостей в циклоні на 5-10% менше, а ніж в циклонному пиловловлювачі, а характер зміни профілів - плавний.

З наведених результатів розрахунків (рисунок 3.10) бачимо, що тангенціальна складовашвидкість потоку в циліндричній частині внутрішнього корпусу циклонного пиловловлювача в області жалюзійного елемента в 6 (відношення тангенціальної складової швидкості по дузі 3 та 4 рисунок 3.3 б), 9 (відношення тангенціальної складової швидкості по дузі 2 та 5 рисунок 3.3 б) та 13 (відношення тангенціальної складової швидкості по дузі 1 та 6 рисунок 3.3 б) разів вища, ніж тангенціальна складовашвидкість потоку в зовнішньому корпусі циклонного пиловловлювача. Причому така залежність у зміні тангенціальної складової швидкості спостерігається по мірі віддалення від області жалюзійного елемента: у внутрішньому корпусі - від жалюзійного елемента в напрямку вихідної труби, а у зовнішньому корпусі - від області жалюзійного елемента в напрямку стінки зовнішнього корпусу. Якщо порівнювати значення тангенціальної складової швидкості в пристінній області у внутрішньому корпусі циклонного пиловловлювача (дуга 3 рисунок 3.3 б) з тангенціальною складовою швидкістю у зовнішньому корпусі циклонного пиловловлювача (дуга 4, 5 та 6 рисунок 3.3 б), то це відношення становитиме 6, 7 та 8 разів відповідно. Також, з рисунку 3.7 видно, що швидкість руху газового потоку в зовнішньому корпусі приблизно в 10 разів менша за швидкість руху газового потоку у внутрішньому корпусі апарата.

Провівши додаткові розрахунки тангенціальної складової швидкості для моделей циклонного пиловловлювача з різними співвідношеннями зовнішнього та внутрішнього корпусів можна побудувати залежність, що представлена на рисунку 3.11.

З графіка видно, що залежність зміни співвідношення тангенціальної складової швидкості при переході потоку з внутрішнього корпусу у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача при різних співвідношеннях

діаметрів цих корпусів має лінійний вигляд. Причому ця залежність

збільшується від області жалюзійного елемента в напрямку стінки зовнішнього корпусу. Також, аналізуючи результати розрахунків (рисунки 3.7 та 3.11) можна зробити висновок про оптимальне співвідношення діаметрів зовнішнього та внутрішнього корпусів, яке знаходиться в межах $D_{\text{зовн.}} = (1,1 \dots 1,3) D_{\text{внутр.}}$. Такий вибір співвідношення діаметрів обумовлений тим, що зменшення модуля швидкості та тангенціальної складової швидкості більше як в 10 разів не є необхідним. Це пояснюється тим, що при малих значеннях модуля швидкості та тангенціальної складової швидкості на частинки в більшій мірі діє сила тяжіння, що унеможлиблює повернення частинок із зовнішнього корпусу циклонного пиловловлювача в основний потік.

Провівши розрахунки №1, 2 та 4 (див. таблицю 3.1) отримали аналогічні наведеним вище дані для аналізу, які приведені в Додатку А. За результатами аналізу отриманих даних зробили висновок про ідентичний характер поведіння газового потоку в наведених апаратах при різних вхідних граничних умовах.

Також проведені аеродинамічні розрахунки надали можливість отримати значення повного аеродинамічного опору апаратів для кожного значення витрат газового потоку на вході та побудувати залежність опору апарата від витрат газового потоку на вході (рисунок 3.12).

Рисунок 3.12 - Залежність аеродинамічного опору в циклоні (1) та циклонному пиловловлювачі (2) від швидкості в перетині апарата

З наведеного графіка бачимо параболічну залежність зростання аеродинамічного опору циклона (1) з 88 до 1613 Па при збільшенні швидкості газового потоку в перетині апарата з 1 м/с до 4 м/с. Аналогічна залежність спостерігається й для циклонного пиловловлювача (2): аеродинамічний опір зростає з 79 до 1572 Па при збільшенні швидкості газового потоку в перетині апарата з 1 м/с до 4 м/с. Це пояснюється тим, що циклонний пиловловлювач (2) близький за своїми конструктивними параметрами до циклона (1). З цього можна зробити висновок про незначний вплив жалюзійного елемента та зовнішнього корпусу на загальний аеродинамічний опір циклонного пиловловлювача.

3.2 Дослідження характеру руху твердих частинок різного медіанного діаметру в запиленому потоці

Отримані результати аеродинамічних досліджень за таблицею 3.1 дають змогу провести серію розрахунків симуляції поведінки запиленого потоку в циклонному пиловловлювачі, використовуючи модуль Particle Studies. Наведений модуль дозволяє дослідити характер руху запиленого потоку (та окремих його твердих частинок) в апараті з урахуванням додаткових до вже перерахованих в таблиці 3.1 фізичних властивостей пилу та режимних параметрів потоку, таких як густина пилу ρ , кг/м³, запиленість потоку c , г/м³. та медіанний діаметр частинок в запиленому потоці d , мкм.

Для циклонного пиловловлювача були проведені розрахунки для семи медіанних діаметрів частинок, відповідно до кожного з чотирьох аеродинамічних розрахунків для пилу, що за фізичними характеристиками відповідає пилу цементу. Густина пилу $\rho=3200$ кг/м³; запиленість потоку $c=30$ г/м³; медіанний діаметр частинок $d=5..35$ мкм з кроком в 5 мкм.

В результаті розрахунків були отримані траєкторії руху твердих частинок в об'ємі апарата та статистичні дані по осадженню твердих частинок в апараті, за якими розраховувалась ефективність роботи циклонного пиловловлювача. На рисунках 3.13 - 3.16 наведено отримані траєкторії руху частинок в запиленому потоці з кольоровою заливкою модуля швидкості руху цих частинок, які дозволяють провести аналіз руху частинок та побачити їх розподіл в апараті.

Аналізуючи наведені рисунки бачимо, що зі збільшенням медіанного діаметру частинок потік рухається ближче до периферійних стінок апарата внаслідок збільшення питомої маси твердої частинки та, відповідно, збільшення її відцентрової швидкості. Також спостерігається розподілення твердих частинок між двома ізольованими один від одного бункерами в приблизному співвідношенні вловлених частинок 20 до 80, тобто 20% твердих частинок потрапляє в зовнішній бункер.

Рисунок 3.13 - Траєкторії руху твердих частинок різного медіанного діаметра для розрахунку №1

1, 4, 7, 10, 13, 16, 19 - фронтальний вигляд апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно; 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20 - аксонометричний вигляд апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно; 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 - вигляд зверху на апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно

Рисунок 3.14- Траєкторії руху твердих частинок різного медіанного діаметра для розрахунку №2

1, 4, 7, 10, 13, 16, 19 - фронтальний вигляд апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно; 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20 - аксонометричний вигляд апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно; 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 - вигляд зверху на апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно

Рисунок 3.15 - Траєкторії руху твердих частинок різного медіанного діаметра для розрахунку №3

1, 4, 7, 10, 13, 16, 19 - фронтальний вигляд апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно; 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20 - аксонометричний вигляд апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно; 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 - вигляд зверху на апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно

Рисунок 3.16- Траєкторії руху твердих частинок різного медіанного діаметра для розрахунку №4

1, 4, 7, 10, 13, 16, 19 - фронтальний вигляд апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно; 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20 - аксонометричний вигляд апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно; 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 - вигляд зверху на апарата з траєкторіями частинок, діаметром 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 мкм, відповідно

Провівши порівняльний аналіз даних рисунків 3.13 - 3.16 для відповідних медіанних діаметрів частинок пилу, можна зробити висновок, що зі збільшенням швидкості в перетині апарата з 1 м/с до 3 м/с збільшується віднесення частинок до периферії. Особливо помітно цю різницю при аналізі дрібних частинок в межах від 5 до 15 мкм. Виходячи з цього можна зробити висновок, що зі збільшенням витрати газового потоку на вході, а отже і збільшення швидкості, зростає ефективність вловлювання дрібнодисперсної фази.

Аналіз отриманих статистичних даних осадження твердих частинок дав змогу отримати та побудувати у вигляді графіків залежність ефективності вловлювання твердої фази від медіанного діаметру частинок для постійної густини пилу (рисунок 3.17) та від густини пилу для постійного медіанного діаметру (рисунок 3.18).

1 - швидкість в перетині апарата 1 м/с; 2 - швидкість в перетині апарата 2 м/с; 3 - швидкість в перетині апарата 3 м/с; 4 - швидкість в перетині апарата 4 м/с

Рисунок 3.17- Парціальна ефективність вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі

На рисунку 3.17 наведено залежність ефективності вловлювання твердих частинок від медіанного діаметру частинок для густини пилю $\rho=3200 \text{ кг/м}^3$. На цьому рисунку бачимо зростання парціальної ефективності апарата зі збільшенням швидкості газового потоку в перетині циклонного пиловловлювача.

На рисунку 3.18 наведено залежність коефіцієнту вловлювання твердих частинок від густини пилю для медіанного діаметру частинок 20 мкм. На цьому рисунку бачимо зростання ефективності апарата зі збільшенням густини твердої фази, що пояснюється зростанням питомої маси твердої частинки, а отже і зростання її радіальної та відцентрової складових швидкостей.

1 - швидкість в перетині апарата 1 м/с; 2 - швидкість в перетині апарата 2 м/с; 3 - швидкість в перетині апарата 3 м/с; 4 - швидкість в перетині апарата 4 м/с

Рисунок 3.18 - Залежність коефіцієнту вловлювання твердих частинок від густини пилю

Порівнюючи наведені на рисунках 3.17 та 3.18 графіки можна зробити припущення, щорежим роботи апарата в межах швидкості в перетині апарата 3 м/с має найкращі показники ефективності роботи циклонного пиловловлювача.

Як можна побачити з рисунків 3.17 та 3.18 залежність ефективності вловлювання твердих частинок має майже постійно зростаючий характер при збільшенні швидкості газового потоку в перетині апарата. Також потрібно звернути увагу на криві для значень швидкості в перетині апарата від 2 м/с до 4 м/с, адже характер їх зміни майже ідентичні один одному. Проте крива, яка відповідає значенню швидкості в перетині апарата 4 м/с (рисунок 3.17), в межах медіанних діаметрів твердих частинок 5..23 мкм має на 2-4% менші значення ефективності вловлювання за аналогічні для кривих для швидкості в перетині апарата 3 м/с. Аналогічна картина спостерігається для діапазону густини пилу 1200..3500 кг/м³ (рисунок 3.18). Виходячи з вище сказаного, можна зробити припущення, що в межах швидкості в перетині апарата 3 м/с циклонний пиловловлювач має найбільш стабільні показники ефективності вловлювання, числові значення яких є максимальними.

Для швидкості в перетині циклонного пиловловлювача 3 м/с була знайдена парціальна ефективність вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі при різних температурних режимах дослідження апарата (рисунок 3.19).

1 - $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 - $t=60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 - $t=80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 - $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3.19 - Парціальна ефективність вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі для швидкості в перетині апарата $v=3\text{ м/с}$

З графіка можна побачити, що із збільшенням температури газового потоку парціальна ефективність вловлювання твердих частинок в циклонному пиловловлювачі зменшується, що свідчить про вплив температури на

ефективність вловлювання твердих частинок пилю в циклонному пиловловлювачі.

3.3 Перевірка адекватності розробленої математичної моделі

Проведене комп'ютерне моделювання аеродинаміки та ефективності апарата дають можливість оцінити адекватність розробленої математичної моделі.

На рисунку 3.20 наведено залежності аеродинамічного опору апарата, отримані в результаті математичного та комп'ютерного моделювання, від швидкості в перетині апарата.

1 - математична модель; 2 - комп'ютерне моделювання

Рисунок 3.20 - Залежність аеродинамічного опору від швидкості в перетині циклонного пиловловлювача

На цьому рисунку можна побачити що криві, побудовані за результатами математичного так комп'ютерного моделювання мають схожий характер. Різниця між даними, отриманими в результаті математичного та комп'ютерного моделювання становить 13,9%.

Порівняємо результати розрахунку ефективності вловлювання твердої фази від медіанного діаметру частинок для комп'ютерного моделювання з результатами розрахунків за математичною моделлю (рисунки 3.21 - 3.24).

1 - комп'ютерне моделювання; 2 - математичне моделювання

Рисунок 3.21 - Залежності парціальної ефективності від медіанного діаметра частинок пилу для швидкості в перетині апарата $v=1$ м/с

1 - комп'ютерне моделювання; 2 - математичне моделювання

Рисунок 3.22 - Залежності парціальної ефективності від медіанного діаметра частинок пилу для швидкості в перетині апарата $v=2$ м/с

1 - комп'ютерне моделювання; 2 - математичне моделювання

Рисунок 3.23 - Залежності парціальної ефективності від медіанного діаметра частинок пилу для швидкості в перетині апарата $v=3$ м/с

1 - комп'ютерне моделювання; 2 - математичне моделювання

Рисунок 3.24 - Залежності парціальної ефективності від медіанного діаметра частинок пилу для швидкості в перетині апарата $v=4$ м/с

Аналізуючи наведені залежності, слід відмітити схожий характер кривих, отриманих за результатами математичного та комп'ютерного моделювання. Різниця між результатами математичного та комп'ютерного моделювання по фракційній ефективності апарата складає 1,058 %.

Внаслідок цього можна зробити висновок про адекватність розробленої математичної моделі даним, отриманим в результаті комп'ютерного моделювання.

Технології числового моделювання турбулентних потоків дозволяють досліджувати існуючі конструкції циклонних апаратів і розробляти принципово нові конструкції пиловловлювачів, які будуть мати високий коефіцієнт уловлювання дрібнодисперсних частинок при низькому аеродинамічному опорі.

3.4 Висновки до розділу

1. За результатами чисельного розрахунку аксіальної складової швидкості руху газового потоку в апаратах було встановлено, що максимум аксіальної складової швидкості (для перерізу $Y=0,72$ м; $u=2,2$ м/с; для перерізу $Y=0,62$ м; $u=3,2$ м/с) в циклонному пиловловлювачі спостерігається біля периферійної стінки циліндричної частини (в циклоні максимумами аксіальної складової швидкості спостерігається ближче до стінок вихідної труби: для перерізу $Y=0,72$ м; $u=2,2$ м/с; для перерізу $Y=0,62$ м; $u=5,0$ м/с), що зменшує віднесення чималої частини пилу, тим самим збільшуючи ефективність апарата.

2. В результаті числового розрахунку модуля швидкості руху газового потоку в апараті було встановлено, що модуль швидкості в зовнішньому корпусі апарата складає приблизно 10 % від швидкості потоку у внутрішньому корпусі апарата. Така швидкість газового потоку в зовнішньому корпусі свідчить про те, що в зовнішньому корпусі частинки осідають під дією сил тяжіння, що мінімізує можливість потрапляння твердих частинок назад в основний потік.

3. В результаті ряду розрахунків була встановлена лінійна залежність зменшення тангенціальної швидкості при переході потоку з внутрішнього корпусу у зовнішній корпус циклонного пиловловлювача при різних співвідношеннях діаметрів апарата. Причому було встановлено оптимальне співвідношення діаметрів зовнішнього та внутрішнього корпусів, яке знаходиться в межах $D_{\text{зовн.}} = (1,1 \dots 1,3) D_{\text{внутр.}}$.

4. В результаті розрахунку парціальної ефективності вловлювання полідисперсних твердих частинок для різних значень швидкості в перетині апарата було виявлено наступне, що зростання коефіцієнту вловлювання частинок має постійно зростаючий характер до критичного значення швидкості в перетині апарата 4 м/с, при якому спостерігається винос твердих частинок з зовнішнього корпусу до основного потоку. При значеннях швидкості в перетині апарата 3 м/с, майже 20% твердих частинок за масою

осідають в зовнішньому бункері, що свідчить про вплив жалюзійного елемента на загальний коефіцієнт вловлювання апарата.

5. Перевірено адекватність розробленої математичної моделі даним, отриманим в результаті комп'ютерного моделювання. Різниця між результатами математичного та комп'ютерного моделювання по аеродинамічному опору апарата складає 13,9 %, а по фракційній ефективності апарата - 1,058%.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

ВСТУП

Як видно з основної частини магістерської дисертації, в роботі використовуються матеріали, що можуть бути джерелами шкідливих факторів. Передбачене використання електроенергії.

Всі рішення передбачені в магістерській роботі розроблені з урахуванням вимог охорони праці та пожежної безпеки.

В даному розділі на основі аналізу шкідливих і небезпечних факторів розроблені заходи щодо покращення умов праці на робочому місці.

4.1 Охорона праці

4.1.1 Виявлення та аналіз ШНВФ на проектному об'єкті (в умовах виконання експериментальної частини науково дослідної роботи).

4.1.1.1 Повітря робочої зони

Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 в лабораторії, виконуються роботи, що відносяться до категорії Ia (легка). У табл. 4.1. приведено припустимі значення параметрів мікроклімату в лабораторії.

Таблиця 4.1 - Допустимі норми і фактичні значення температури, та відносної вологості, швидкості руху повітря в лабораторії (ДСН 3.3.6.042-99)

Період року	Мікрокліматичні параметри на постійних місцях						Допустима температура поза робочою зоною
	Допустимі норми						
	Температура, °С		Відносна вологість повітря %		Швидкість руху повітря, м/с		
	оптим.	фактич.	оптим.	фактич.	оптим.	фактич.	
Холодна і перехідна температура зовнішнього повітря нижче +10°C	21-25	21	40-60	50	0,1	0,02	15-26
Тепла температура зовнішнього повітря вище +10°C	22-26	25	40-60	65	Не більш 0,2	0,03	

В таблиці 4.2 наведена стисла характеристика виробничого приміщення.

З метою нормалізації повітря робочої зони передбачені наступні заходи:

- у холодний час року температура підтримується за допомогою системи центрального опалення;
- відносна вологість і швидкість руху повітря регулюються за допомогою кватирок, оскільки в лабораторії відсутні вентилятори і кондиціонери;
- очищення повітря робочої зони від пилу рослинного і тваринного походження з домішками SO₂, що виділяється з одягу, книг, меблів і ін.;
- у лабораторії ОТ регулярно проводиться вологе прибирання (не рідше одного разу в день); крім того, перед початком роботи програмісти протирають екрани моніторів
- шкідливими речовинами, що використовуються при профілактичних роботах з ЕОМ, є ацетон і етиловий спирт. Ці речовини зберігаються в

лабораторії в невеликих кількостях (не більш 300 мл кожного).

Таблиця 4.2. - Коротка санітарна характеристика лабораторії ОТ

Найменування виробничої ділянки лабораторії, установки	Шкідливі речовини, що виділяються, і причини їхнього виділення	Група шкідливої речовини, характеристика токсичної дії	ГДК шкідливої речовини, повітря робочої зони	Клас небезпечки шкідливої речовини	Засоби доікарської допомоги	Санітарна норма технологічного процесу	Клас підприємства, виробництва
1	2	3	4	5	6	7	8
Лабораторія ОТ	Етиловий спирт випаровується з відкритих поверхонь	Загальнотоксичне	1000	IV	Свіже повітря при несприятливому стані,	1a	V
	Ацетон-легколетучий, випаровується з відкритих поверхонь	Загальнотоксичне	200	IV	вдихання нашатирного спирту, міцний чай, кава	1a	V
	Пил рослинного і тваринного походження з домішками SiO ₂ від 2 до 10%. Виділяється з одягу.	Здатне викликати алергічні захворювання в виробничих умовах, фіброген	4	IV		1a	V

4.1.1.2 Виробниче освітлення

Лабораторія обчислювальної техніки за умовами роботи згідно ДБН В.2.5.28-2006 відноситься до розряду IVa - середньої точності. У таблиці 4.3 надані норми освітленості в лабораторії ОТ (згідно ДБН В.2.5-28-2006).

Відповідно до особливостей роботи використовується три види освітлення - природне бокове, штучне і суміщене. Норми робочих місць вибираються згідно з ДБН В.2.5-28-06.

Система загально освітлення забезпечує штучне освітлення в приміщеннях з ПК. Як джерела світла при штучному освітленні застосовуються переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ-40.

Суцільні лінії світильників забезпечують загальне освітлення. Вони розміщуються збоку від робочих місць (переважно зліва) паралельно лінії зору працівників. Застосовуються світильники класу П - світильники прямого світла, в якому не менше 80% світлового потоку спрямовано на робочу поверхню. Світильники класу П зображений на рисунку 4.1

Рисунок 4.1 - Світильник класу П. Світильник прямого світла

Таблиця 4.3. - Необхідні норми освітлення в лабораторії ОТ

Характеристика зорової роботи	Розряд зорової роботи	Штучне освітлення			Природне освітлення	Суміщене освітлення				
		Освітленість, лк			КПО, e_n , %					
		При системі комбінованого освітлення			При системі загального освітлення	При верхньому або комбінованому освітленні	При боковому освітленні	При верхньому або комбінованому освітленні	При боковому освітленні	
		всього	Нормальне значення	Фактичне значення						
Середньої точності	IVa	750	200	300	300	4	1,5	2,4	0,9	

4.1.1.3 Захист від виробничого шуму і вібрації

У лабораторії ОТ основним джерелом шуму є :

- АЦДП;
- периферійні пристрої.

Згідно ДСН 3.3.6.037-99 "Шум. Санітарні норми виробничого шуму", у приміщеннях, де розміщені шумові агрегати ЕОМ, передбачений рівень шуму до 50 дБА.

Найбільш ефективним методом є раціональне застосування пружної ізоляції. Акустична обробка приміщення полягає в покритті стелі і стін матеріалом з низьким коефіцієнтом відображення звуку : пористими плитами ПП-2.

Джерелом вібрації при працюючої ЕОМ є в основному друкувальні пристрої і приводи індивідуальних вентиляторів, встановлених у корпусі

ЕОМ. Рівень вібрації згідно ДСН 3.3.6.037-99 не перевищує значення 120 дБА. У лабораторії ОТ рівень вібрації малий і не робить шкідливого впливу на людину.

4.1.1.4 Електромагнітні поля

Працівники ОЦ при роботі на ЕОМ піддаються впливу електромагнітних полів радіочастот. Установлені норми припустимої напруженості електромагнітного поля чи радіочастот на робочих місцях і в місцях можливого перебування персоналу відповідно до ГОСТ 12.1.006-84.

4.1.1.5 Іонізуючі випромінювання

Дисплеї ЕОМ є основними джерелами іонізуючих випромінювань. Відповідно до НРБУ-97 програмісти й оператори ЕОМ відносяться до категорії А осіб, що опромінюються (персонал). Дисплеї терміналів випромінюють м'які рентгенівські випромінювання, електрони. Ці види випромінювань відносяться до зовнішнього.

Відеомонітори на електронно-променевих трубках (ЕПТ) є потенційними джерелами гігієнічно значимих рівнів електромагнітних випромінювань в діапазоні частот 50 Гц — 300 МГц і статичного електричного поля.

Напруженість ЕМП в діапазоні 30 КГц — 300 МГц на відстані 0,3 м від усіх поверхонь відеомонітора не повинна перевищувати значень, наведених в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 Гранично-допустимі значення електромагнітного випромінювання

Частота електромагнітного випромінювання	Гранично допустимий рівень
50 Гц	500 В/м
30—300 КГц	25 В/м
0,3—3 МГц	15В/М
3—300 МГц	3В/м

Як захід безпеки від іонізуючого поля класи оснащені новими комп'ютерами з рідкокристалічними екранами, електромагнітне та іонне поле яких, зведене до мінімуму.

4.1.1.6 Електробезпека

Основною небезпекою при роботі на ЕОМ є можливість ураження електричним струмом. У лабораторії ОТ знаходиться електроустаткування:

- персональні ЕОМ;
- АЦДП;
- джерела освітлення.

Для живлення електричним струмом електроустаткування встановлена 3-фазна 4-провідна мережа змінного струму промислової частоти із глухозаземленою нейтраллю напругою 380/220В.

У лабораторіях ОТ підлоги має антистатичне покриття (припустима напруженість електричного поля по ГОСТ 12.1.002-84 -20 кВ під час однієї години), проводиться контроль аероіонізації повітря (оптимальний рівень $1,5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10$ в одному кубічному см повітря).

Для попередження електротравматизму проводяться наступні організаційні заходи:

- 1) ознайомлення працюючого з технікою безпеки при роботі на машині;
- 2) у випадку ремонту ЕОМ ставиться табличка, що повідомляє про це;
- 3) перевірка знань правил безпеки й інструкцій;
- 4) допуск до виконання робіт на ЕОМ оформляється у відповідній відомості.

Технічні заходи:

- 1) ізоляція струмоведучих елементів;
- 2) видалення струмоведучих елементів у недоступні місця;
- 3) огороження струмоведучих елементів;
- 4) занулення струмоведучих елементів ЕОМ.

Основним технічним засобом, що забезпечує електробезпеку є:

- захисне заземлення;
- подвійна ізоляція;
- електричний поділ ланцюгів.

Для зниження напруженості електростатичного поля використовуються наступні способи:

- екранування джерела чи поля робітника місця;
- застосування нейтралізаторів статичної електрики;
- застосування антистатичних чи препаратів зволоження матеріалу, що електризується.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1 Атестація робочого місця

Місце роботи - лабораторія обчислювальної техніки.

Таблиця 4.7 - Карта умов праці на робочому місці

Відповідальний за заповнення карти _____ Набок О.М.

Дата заповнення _____ 15.04.2015

№п/п	Фактори виробничого середовища	Норматив ГДР, ГДК	Фактичне значення	Ступінь шкідливості факторів	Тривалість за зміну, Т	Шкідливість фактична (Xфакт), балів
1	2	3	4	5	6	7
2	Пил, мг/м ³	4	Менше 1	-	0.3	
3	Шум, дБА	50	40	-	1	
4	Мікроклімат у приміщенні: температура повітря, °С швидкість руху повітря, м/с відносна вологість повітря, %	21 0.1 50	19,5 0.1 55± 5%	1		
5	Важкість праці: динамічна робота Статичне навантаження Робоча поза нахил тулуба Переміщення		Перебування у нахиленому положенні до 30° більше 25% часу за зміну	1	1	1
6	Напруженість праці: Увага Напруженість аналізаторних функцій Монотонність змінність		Груба і малої точності 3-2			1

Сума значень факторів виробничого середовища, ($\sum X_{\text{факт}}$) балів.....2

Розмір доплати за умови праці, %.....4

Як видно з карти умов праці, робоче місце оператора ПК підлягає раціоналізації.

4.2.2 Пожежна безпека

Основні вимоги, що висуваються до приміщень і будинків ОЦ, викладені в "Інструкції з проектування будинків і приміщень для ЕОМ" СН 512-78.

Машинні зали, за пожежовибухонебезпечністю відносяться до категорії В за ОНТП 24-86.

Горючими компонентами в лабораторії ОТ є: будівельні матеріали, що використовуються для акустичної і естетичної обробки приміщень, перегородки, віконні рами, двері, підлога, меблі, портъери, перфострічки і карти, ізоляція кабелів, різні рідини, застосовувані для очищення елементів і вузлів ЕОМ від забруднення (Як було сказано вище, обсяг таких невеликий - не більш 300 мол). Джерела запалювання - електричні іскри, дуги, що виникають при пробі ізоляції і при нагромадженні заряду статичної електрики, перегріті ділянки елементів і конструкцій пристроїв ЕОМ (деякі елементи ЕОМ можуть нагріватися до 80-100°C). Джерела запалювання виникають в електричних і електронних приладах, у системах кондиціонування повітря й електропостачання.

Усі приміщення обчислювальних центрів обладнані установками автоматичної пожежної сигналізації та пожежогасіння. Приміщення, в яких розташовуються персональні електронно-обчислювальні машини (ЕОМ, ПЕОМ) та дисплейні зали, (де влаштування систем автоматичного пожежогасіння не обов'язкове), оснащені переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку 2 шт. на кожні 20 м² площі приміщення.

Перфокарти, перфострічки, магнітні стрічки та пакети магнітних дисків (сховища інформації) зберігаються в окремому приміщенні, яке обладнане негорючими стелажамі і шафами. Перфокарти, перфострічки та магнітні

Ремонт вузлів (блоків) ЕОМ в машинному залі не виконується. Для цієї мети використовують окремі приміщення (майстерні). Для промивання деталей ЕОМ і ПЕОМ використовуються негорючі мийні засоби.

Промивання чарунок та інших знімних пристроїв горючими рідинами (спирт, бензин тощо) здійснюється у спеціальних приміщеннях, обладнаних припливно-витяжною вентиляцією.

У приміщеннях обчислювальних центрів заборонено:

- використовувати плівки на нітрооснові;
- встановлювати електророзетки на горючій основі;
- користуватися побутовими електронагрівальними приладами;
- захарашувати евакуаційні виходи та проходи; встановлювати на вікнах глухі фати;
- користуватися відкритим вогнем;
- залишати без нагляду ввімкнену в електромережу апаратуру, яка використовується для вимірювання і контролю.

Після закінчення роботи перед закриттям приміщення всі електроустановки та персональні комп'ютери слід вимкнути з мережі електроживлення. Показники пожежобезпечності приведені в таблиці 4.8

Таблиця 4.8. - Показники пожежобезпечності електроізоляційних матеріалів (СНиП 2.09.02-85). Класифікація виробництва пожежо- і вибухонебезпечності та влаштування блискавкозахисту

Назва лабораторії	Речовини, що мають обіг у роботі, ГОСТ	Агрегатний стан речовин в нормальних умовах	Горючість, займістість	Показники пожежо- і вибухонебезпечності, °С			Межа заpalення		Вибухонебезпечні суміші з повітрям		Вогнегасні засоби	Категорія приміщення за СНиП 2.09.02-85	Клас лабораторії згідно з ПБЕ	Категорія лабораторії і тип зони захисту і влаштування блискавкозахисту згідно з СНиП 2.09.02-85
				Температура спалаху	Температура займання	Температура самозаймання	% об'ємних	мг/м ³	Категорія	Група				
Лабораторія ОТ	Бутиловий спирт	рідкий	горить	34	310	345	4,5 - 14,5	-	-	-	Об'ємне гасіння			
	Метилетилкетон	рідкий	горить	606	620	650	-	-	IA	T1	Вода	A	2	Категорія II, зона В-Іб
	2-амінобутан	газ	горить	200	200	235	-	-	-	-	ВВ-2, ВВ-5			

4.2.3 Безпека технологічних обладнання

Потенційно небезпечним технологічним обладнання у лабораторії ОТ є безпосередньо комп'ютери та допоміжне комп'ютерне обладнання (принтер, сканер, проектор тощо).

Одною із причин можливого відхилення від нормального протікання процесів є пошкодження кабелів, що пов'язане із необережним поведінням особи, що виконує науково дослідну роботу. Таким чином, наслідком такого порушення нормального режиму роботи технологічного обладнання є припинення роботи обладнання, втрата виконаної роботи, вихід з ладу систем охолодження та вентиляції. Тому фактор особистої відповідальності та обережності відіграє важливу роль.

Також, до можливих причин відхилення від нормального протікання процесів є перебої в електричній системі. Щоб уникнути даних проблем у лабораторії встановлено пристрій безперервного живлення.

Наступними чинниками, що викликають порушення нормального режиму роботи технологічного обладнання є надлишок пилу, що осідає на внутрішніх частинах комп'ютера та статична електрика, яка накопичується на електричних платах та на корпусі комп'ютера. Щоб запобігти виникненню цих обставин, періодично проводиться чистка обладнання та відведення статичної електрики шляхом заземлення.

4.2.4 Аналіз небезпеки об'єкта

Згідно положення N 224 від 01.10.2007 про затвердження та розробку планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій лабораторія ОТ відноситься до категорії А.

На основі аналізу особливостей роботи лабораторії ОТ виявляється можливість виникнення аварійної ситуації. Небезпеку спричинення аварії становить пожежа. Джерелом пожежі є електричні іскри, дуги, що виникають

при короткому замиканні (пробої ізоляції, нагромадженні заряду статичної електрики, пилу), перегрівання ділянки елементів і конструкцій пристроїв ЕОМ (деякі елементи ЕОМ можуть нагріватися до 80-100°C), неправильне підключення вузлів живлення в середині блоку комп'ютера. Джерела запалювання виникають в електричних і електронних приладах, у системах кондиціонування повітря й електропостачання.

При виникненні пожежі слід виконувати наступний план дій: подати звуковий сигнал пожежної тривоги - сирена; викликати пожежну команду за телефоном «101»; почати пожежогасіння всіма підручними засобами - вогнегасник, пісок; негайно сповістити про пожежу інженера, почати евакуацію.

Для того щоб уникнути вищеперерахованих ситуацій необхідно проводити первинний інструктаж з техніки безпеки, а також дотримуватися правил техніки безпеки на робочому місці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Защита атмосферы от промышленных загрязнений / под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда. М.: Металлургия, 1988. – С. 760
2. Охрана окружающей среды / [Белов С.В., Барбинов Ф.А., Козьяков и др.]; под ред. С.В. Белова. [2 - е изд. перераб. и доп.] М.: Высш. шк., 1991.- 319 с.
3. <http://base.safework.ru/iloenc?doc&nd=857200740&nh>. Основные виды производств и их процессы: опасности и борьба с ними. Paul Demers, Hugh Davies, Timo Kauppinen, Kay Teschke Страница в печатном издании: 157 Раздел X. Отрасли промышленности.
4. Бретшнайдер Б. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль / Б. Бретшнайдер , И. Курфюст ; под ред. А.Ф. Туболкина. Л.: Химия, 1989. –288 с.
5. Грин, Х. Аэрозоли - пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн. Л.: Химия, 1972.- 428 с.
6. Безопасность труда в химической промышленности: учеб. Пособие для вузов / Л. К. Маринина [и др.]; под ред. Л. К. Марининой. М.: Академия, 2006. - 528 с.
7. ГОСТ 12.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
8. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешнико Н.С.в. Техника защиты окружающей среды: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия,1989. - 512с.
9. Пчелинцев В.А., Коптев Д.В., Орлов Г.Г. Охрана труда в строительстве: Учеб. Для строит. вузов и фак. М.: Высш. Шк., 1991. - 272 с.
10. Балтренас П.Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов. / П.Б. Балтренас. М.: Стройиздат, 1990. - 180 с.

11. Ужов В.Н. Борьба с пылью в промышленности / В.Н. Ужов. М.: Госхимиздат, 1962. - 183 с.
12. Штокман Е.А. Очистка воздуха: учебное пособие / Е.А. Штокман. М.: Изд-во АСВ, 1998.-320 с.
13. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки / В.В. Белоусов. - М.: Metallurgy, 1988. - 256 с.
14. Шияев М.И. Методы расчета пылеуловителей: учебное пособие / М.И. Шияев, А.М. Шияев, Е.П. Грищенко. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2006. - 385 с.
15. Ужов В.Н. Очистка газов мокрыми фильтрами / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальберг. М.: Химия, 1972.-247 с.
16. Отопление и вентиляция: В двух частях. 4.2. Вентиляция. / В.Н. Богословский, В.И. Новожилов, Б.Д. Симаков, В.П. Титов. Под ред. д.т.н. В.Н. Богословского. - М.: Стройиздат, 1976. - 439 с.
17. Справочник проектировщика. Вентиляция и кондиционирование воздуха / под ред. И.Г. Староверова. - М.: Стройиздат, 1978. - 509 с.
18. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Тарат Э.Я. Технология пылеулавливания. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. - 192 с.
19. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрыбин Г.М. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. СПб.: Химия, 1993. - 320 с.
20. Федоров Б.С., Чекалов. Л.В. и др. Экотехника. Экологический консорциум "РОСГАЗООЧИСТКА". Режим доступа: [<http://kondore.newmail.ru/Книга> 20.05.2002].
21. Шияев М. И., Шияев А. М., Афонин П. В., Стрельникова Н. А. Исследование процесса пылеулавливания и гидравлического сопротивления в каскаде прямоточных циклонов // Изв.вузов. Сер. Строительство. Сан. Техника. 1999. №8.
22. Гордон Г.М. Пылеулавливание и очистка газов / Г.М Гордон , И.Л.Пейсахов М.: Metallurgy, 1968. - 396 с.

23. Алиев Г.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок / Алиев Г.М. М: Metallurgiya, 1983. - 296 с.

24. Дубинін А.І., Майструк В.В. Перспективні напрямки вдосконалення конструкції циклонів// Вісник ДУ "Львівська політехніка": Хімія, технологія речовин та їх застосування. Львів: ДУ "Львівська політехніка". 1996, № 3. - 117 с.

25. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / Берлянд М.Е. - Л.: Гидрометеоиздат, 1984. - 360 с.

26. Пат. 2226128 Российская Федерация, МПК7 В 04 С 5/08, В 04 С 5/10. Циклон-сепаратор / Е. В. Асмолова, А. П. Зотов, Ю. В. Красовицкий, А. В. Логинов, М. И. Слюсарев, Л. И. Щеглова, Е. А. Шипилова; заявитель и патентообладатель Воронежск. гос. технолог, акад. № 2003105321/15; заявл. 26.02.2003; опубл. 27.03.2004, Бюл. № 9.

27. Пат. 1393486 СРСР, МПК 7 В 04 С 5/08, 5/14. /Центробежный сепаратор /Л. Я. Градус, И. С. Кутузова; заявитель и патентообладатель Л. Я. Градус, И. С. Кутузова; заявл. 18. 04. 1986; опубл. 07. 05. 1988, Бюл. № 17.

28. Пат. 2256510 Российская Федерация, МПК7 В 04 С 9/00. Циклон / А. С. Кочетов, М. О. Кочетова, Т. Д. Ходакова; заявитель и патентообладатель Кочетов А. С, Кочетова М. О., Ходакова Т. Д. № 2004117818/15; заявл. 15.06.2004; опубл. 20.07.2005, Бюл. № 20.

29. Пат. 71979 Україна, МПК12 В 04 С 5/00. /Циклофільтр/ Д. О. Серебрянський, С. В. Плашихін; заявник та патентовласник Д. О. Серебрянський, С. В. Плашихін; заявл. 22.03.2001; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15.

30. Ужов, В.Н. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. М. : Химия, 1981.- 392 с.

31. Справочник по пыле- и золоулавливанию. / Под 122ед.. А.А. Русанова. - Изд. 2-е, перераб. И доп. М. : Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.

32. Циклоны НИИОГАЗ : Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Ярославль : Всесоюзн. объ-ед. по очистке газов и пылеулавливанию, 1970. - 95 с.

33. Серебрянский Д.А. «Экология и промышленность». 2010. - №4. - 18-20 с.

34. Коузов П.А. «Научные труды институтов охраны труда ВЦСПС». вып. 60. 1969. - 3-13 с.

35. Коузов П.А. «Обеспыливание в металлургии». М.:Металлургия. - 1971. -185-196 с.

36. Скрябина Л.А. «Атлас промышленных пылей. Обзорная информация ГИХИНЕФТЕМАШ». 1980г. -13 с.

37. Серебрянський Д.О. Математичне моделювання процесу очищення запиленних газових потоків в циклонному пиловловлювачі / Серебрянський Д.О., Плашихін С.В, Безносик Ю.О., Набок О.М. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков 2014. - №2/10(68). -1116 с.

38. Плашихин С.В. Извлечение твердой фазы из газовой среды в циклоне с тангенциальным подводом / Плашихин С.В, Безносик Ю.А., Серебрянский Д.А. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков 2010. №2/10(44). -43-45 с.

39. Серебрянський Д.О. Фізична модель очистки неоднорідних газових систем в циклофільтрі [Текст]/ Серебрянський Д.О., Плашихін С.В., Захаров О.О. // Збірник тез доповідей II міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ" 01-04 квітня. - Київ 2012. -17-18 с.

40. Дытнерский Ю.И. «Процессы и аппараты химической технологии». / Дытнерский Ю.И. М.: Химия, 1995. - 34 с.

41. Мікульонок І.О. Механічні, гідромеханічні й масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. / Мікульонок І.О. Київ: Політехніка. 2002. - 149 с.

42. Асламова В.С. Интенсификация процесса сепарации в прямоточном циклоне и вентиляторе-пылеуловителе : дис. канд. техн. наук / Асламова Вера Сергеевна. М. : МИХМ, 1987. - 262 с.

43. Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. 8-е изд., М.: ООО «Издательство Оникс», 2006. - 1056 с.

44. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). /Г.Корн, Т.Корн М.: «Наука», 1974. -832 с.

45. Скрыбина Л.А. «Атлас промышленных пылей. Обзорная информация ГИХИНЕФТЕМАШ». 1980г. - 61 с.

46. Гольдштик М. А. Математическая модель отрывных течений несжимаемой жидкости / М. А. Гольдштик // Доклады Академии наук СССР. 1962.-Т. 147, № 6 . -1310-1313 с.

47. Бадатов Е. В. Математическое моделирование процессов переноса тепла и вещества в отрывных течениях с ламинарной областью смешения / Е. В. Бадатов, М. Г. Слинько, В. Е. Накоряков // Теоретические основы химической технологии. 1970. Т. 4, № 5. -687-691 с.

48. Бадатов Е. В. Математическое моделирование процессов переноса в отрывных течениях с турбулентной областью смешения / Е. В. Бадатов, М. Г. Слинько, В. Е. Накоряков // Теоретические основы химической технологии. 1970. Т. 4, № 6. - 868-874 с.

49. Снежкін Ю.Ф. Моделювання гідродинамічних процесів пиловловлювачів / Снежкін Ю.Ф., Серебрянський Д.О., Захаров О.О., Плашихін С.В./ Хімічна промисловість України. -Київ 2013. - №3(116). -55-62 с.

50. Снежкін Ю.Ф.Моделювання процесу очистки неоднорідних газових систем в циклофільтрі / Снежкін Ю.Ф., Серебрянський Д.О., Плашихін С.В., Захаров О.О. // Збірник тез доповідей III міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених

”РЕСУРСОЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ”. Київ 2012. -5-6 с.

51. Плашихин С.В. Очистка газа в циклоне с тангенциальным подводом / Плашихин С.В., Безносик Ю.А., Серебрянский Д.А. // Тези доповідей другої міжнародної науково-практичної конференції «Комп’ютерне моделювання в хімії та технологіях і сталий розвиток». Київ 2010. -116 с.

52. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харитонович, Н.Б. Пономарев. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. -1040 с.

ДОДАТОК А

Результати числового розрахунку моделі циклонного пиловловлювача та циклона за конструктивними розмірами подібного до циклона ЦН-15 з кутом нахилу вхідного патрубку 0°

а, б – повздовжній переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно; в, г – поперечний переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно.

Рисунок А.1 – Поля розподілу статичного тиску в апараті
(розрахунок №1)

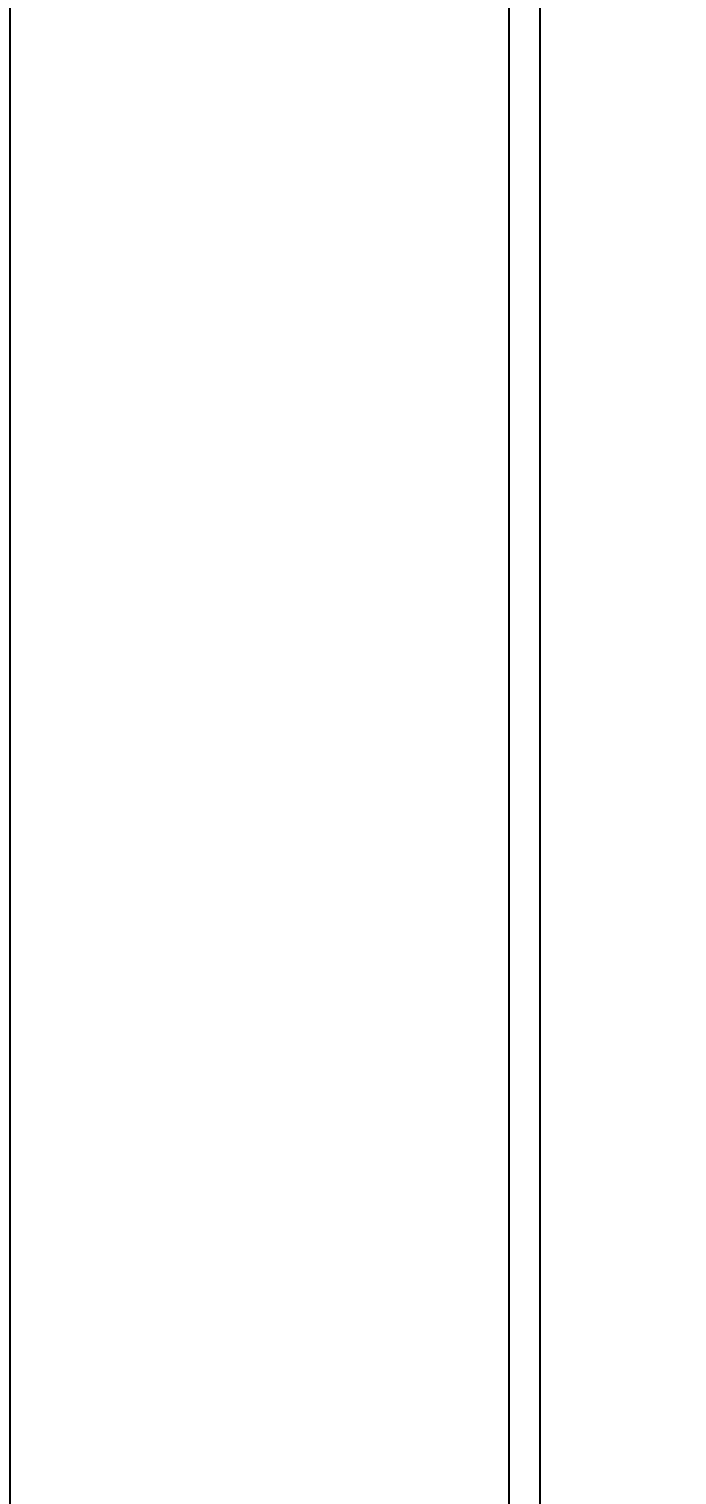
а, б – повздовжній переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно; в, г – поперечний переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно.

Рисунок А.2 – Поля розподілу статичного тиску в апараті
(розрахунок №2)

а, б – повздовжній переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно; в, г – поперечний переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно.

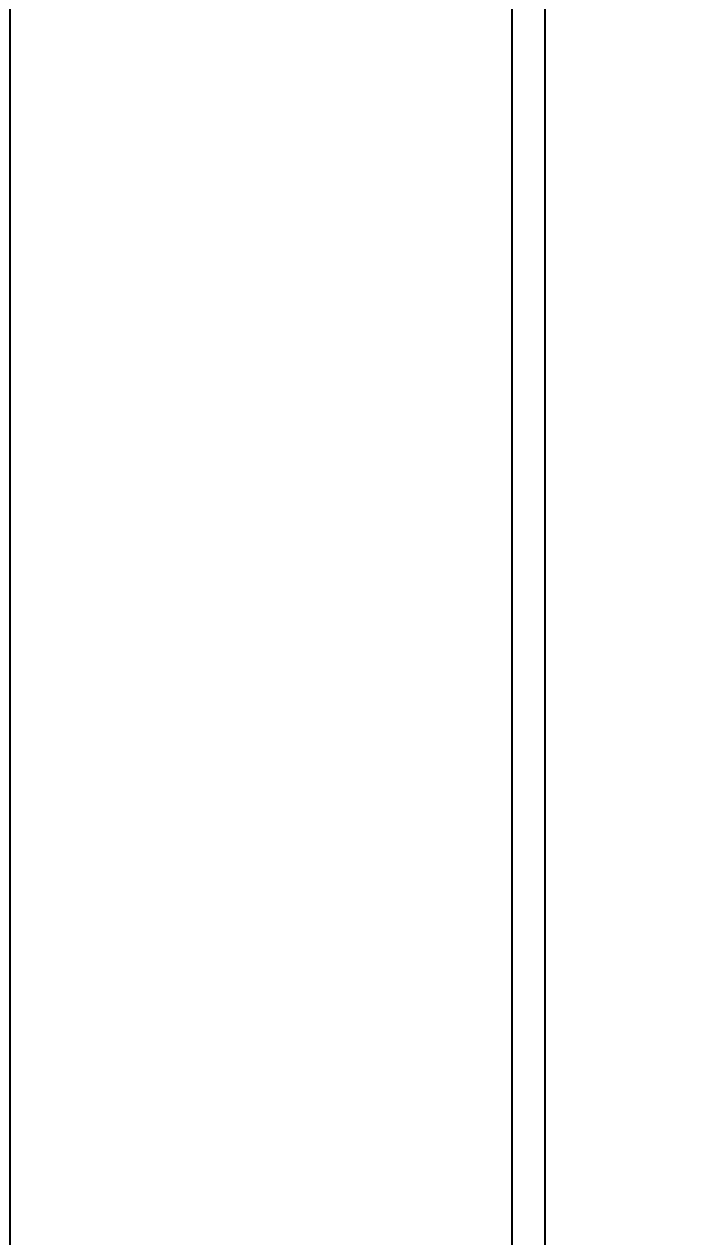
Рисунок А.3 – Поля розподілу статичного тиску в апараті

(розрахунок №4)



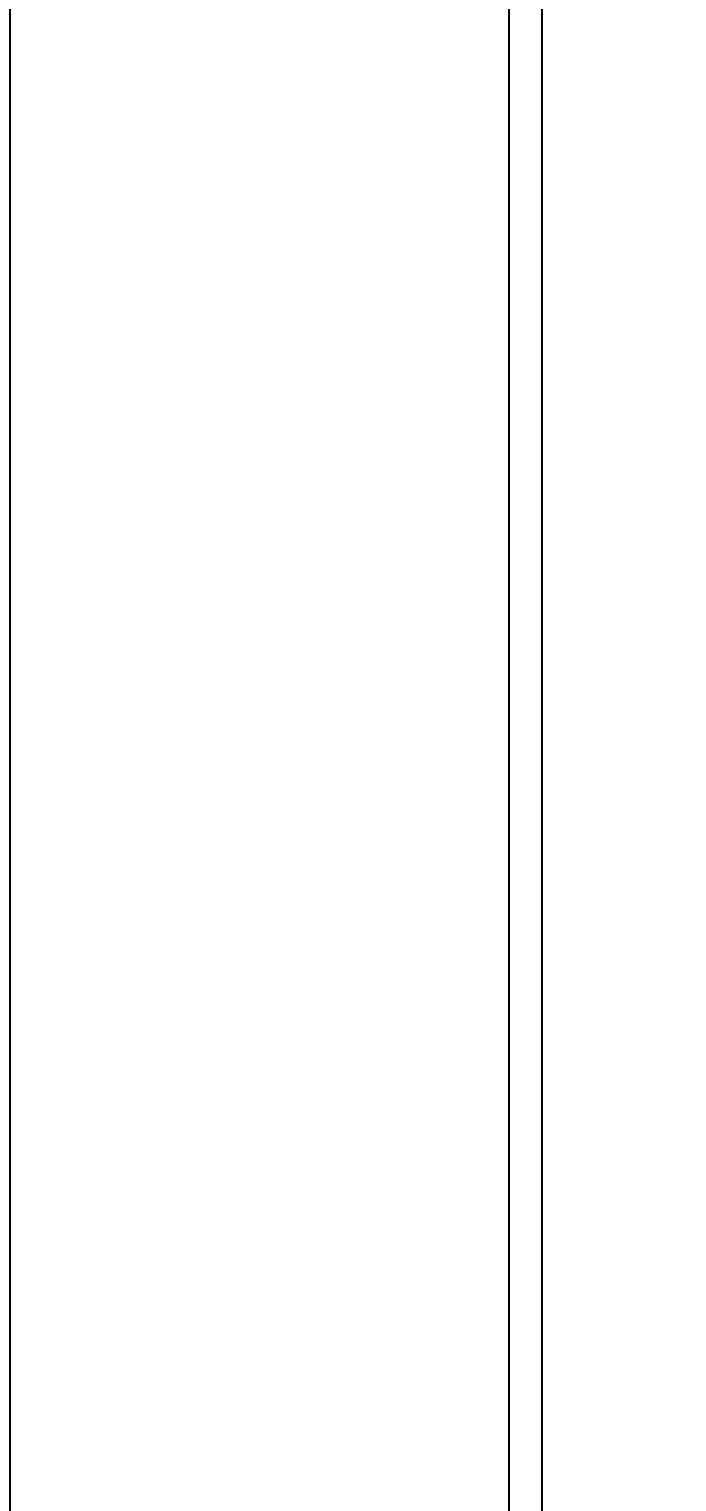
а, в, д – поперечний переріз циклонного пиловловлювача на висоті $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м від початку координат, відповідно; б, г, е – поперечний переріз циклона на висоті $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м від початку координат, відповідно.

Рисунок А.4 – Поля розподілу статичного тиску в перерізах циклонного пиловловлювача та циклона (розрахунок №1)



а, в, д – поперечний переріз циклонного пиловловлювача на висоті $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м від початку координат, відповідно; б, г, е – поперечний переріз циклона на висоті $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м від початку координат, відповідно.

Рисунок А.5 – Поля розподілу статичного тиску в перерізах циклонного пиловловлювача та циклона (розрахунок №2)



а, в, д – поперечний переріз циклонного пиловловлювача на висоті $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м від початку координат, відповідно; б, г, е – поперечний переріз циклона на висоті $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м від початку координат, відповідно.

Рисунок А.6 – Поля розподілу статичного тиску в перерізах циклонного пиловловлювача та циклона (розрахунок №4)

а, б – повздовжній переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно; в, г – поперечний переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно.

Рисунок А.7 – Поля розподілу модуля швидкості в апараті
(розрахунок №1)

а, б – повздовжній переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно; в, г – поперечний переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно.

Рисунок А.8 – Поля розподілу модуля швидкості в апараті
(розрахунок №2)

а, б – повздовжній переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно; в, г – поперечний переріз циклонного пиловловлювача та циклона, відповідно.

Рисунок А.9 – Поля розподілу модуля швидкості в апараті
(розрахунок №4)

а, в, д – профіль тангенціальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3, відповідно; б, г, е - профіль аксіальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3, відповідно.

Рисунок А.10 – Профілі тангенціальної та аксіальної складової швидкостей в циклоні(1) та циклонному пиловловлювачі (2) в перерізі $Y=0,72$ м (розрахунок №1)

а, в, д – профіль тангенціальної, швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3, відповідно;
б, г, е - профіль аксіальної швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3, відповідно.

Рисунок А.11 – Профілі тангенціальної та аксіальної складової швидкостей в циклоні(1) та циклонному пиловловлювачі (2) в перерізі $Y=0,62$ м (розрахунок №1)

а, в, д – профіль тангенціальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3, відповідно; б, г, е - профіль аксіальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3, відповідно.

Рисунок А.12 – Профілі тангенціальної та аксіальної складової швидкостей в циклоні(1) та циклонному пиловловлювачі (2) в перерізі $Y=0,72$ м (розрахунок №2)

а), в), д) – профіль тангенціальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3 відповідно; б), г), е) - профіль аксіальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3 відповідно.

Рисунок А.13 – Профілі тангенціальної та аксіальної складової швидкості в циклоні(1) та циклонному пиловловлювачі (2) в перерізі $Y=0,62$ м (розрахунок №2)

а, в, д – профіль тангенціальної швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3 відповідно; б, г, е - профіль аксіальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3, відповідно.

Рисунок А.14 – Профілі тангенціальної та аксіальної складових швидкостей в циклоні(1) та циклонному пиловловлювачі (2) в перерізі $Y=0,72$ м (розрахунок №4)

а, в, д – профіль тангенціальної швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3 складової відповідно; б, г, е - профіль аксіальної складової швидкості по довжині відрізків 1, 2 та 3 відповідно.

Рисунок А.15 – Профілі тангенціальної та аксіальної складової швидкостей в циклоні(1) та циклонному пиловловлювачі (2) в перерізі $Y=0,62$ м (розрахунок №4)

а, в, д – профіль тангенціальної складової швидкості в циклонному пиловловлювачі по довжині дуг 1, 2 та 3, відповідно в перерізах $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м відповідно; б, г, е - профіль тангенціальної складової швидкості в циклонному пиловловлювачі по довжині дуг 4, 5 та 6, відповідно в перерізах $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м відповідно.

Рисунок А.16 – Профілі тангенціальної складової швидкостей в циклонному пиловловлювачі (розрахунок №1)

а, в, д – профіль тангенціальної швидкості в циклонному пиловловлювачі по довжині дуг 1, 2 та 3 відповідно в перерізах $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та складової $Y=0,72$ м, відповідно; б, г, е - профіль тангенціальної складової швидкості в циклонному пиловловлювачі по довжині дуг 4, 5 та 6, відповідно в перерізах $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м, відповідно.

Рисунок А.17 – Профілі тангенціальної швидкостей в циклонному пиловловлювачі (розрахунок №2)

а, в, д – профіль тангенціальної складової швидкості в циклонному пиловловлювачі по довжині дуг 1, 2 та 3, відповідно в перерізах $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м відповідно; б, г, е - профіль тангенціальної швидкості в циклонному пиловловлювачі, по довжині дуг 4, 5 та 6, відповідно в перерізах $Y=0,62$ м, $Y=0,67$ м та $Y=0,72$ м, відповідно.

Рисунок. А.18 – Профілі тангенціальної складової швидкостей в циклонному пиловловлювачі (розрахунок №4)

ДОДАТОК Б**Розрахунок циклонного пиловловлювача**

Б1. Алгоритм розрахунку циклонного пиловловлювача

Для розрахунку циклонного пиловловлювача необхідні такі вихідні дані:

- об'єм очисного газу при робочих умовах Q , м³/с;
- густина газу при робочих умовах ρ_z , кг/м³;
- динамічна в'язкість газу при робочій температурі μ , Па·с;
- запиленість газу C , кг/м³;
- густина частинок $\rho_{\text{ч}}$, кг/м³;
- медіанній діаметр частинок d_m , мкм;
- необхідна ефективність очистки газу η .

Розрахунок циклонного пиловловлювача проводиться в наступній послідовності.

Задаємо оптимальною швидкістю газу в перетині апарату $\omega_{\text{опт}}$ (3 м/с).

Розраховуємо необхідну площу перетину апарату, м²

$$F = \frac{Q}{\omega_{\text{опт}}}. \quad (\text{Б.1})$$

Розраховуємо діаметр внутрішнього корпусу апарату, м

$$D = \sqrt{\frac{F}{0.785}}. \quad (\text{Б.2})$$

Діаметр внутрішнього корпусу апарату округлюємо до величини, вказаній в таблиці по компоновці циклонів ЦН в групі

Розраховуємо дійсну швидкість газу в перетині апарату, м/с

$$\omega = \frac{Q}{0.785D^2}. \quad (\text{Б.3})$$

Швидкість газу в апараті не повинна відхилитися від оптимальної більш ніж на 15%.

Визначившись з діаметром внутрішнього корпусу апарату розраховуємо основні його конструктивні габарити:

- внутрішній діаметр зовнішнього корпусу, м

$$D_{\text{зовн}} = (1.1 \div 1.3)D. \quad (\text{Б.4})$$

- внутрішній діаметр вихідної труби, м

$$d = (0.5 \div 0.6)D. \quad (\text{Б.5})$$

- внутрішній діаметр пиловипускного отвору, м

$$d_1 = (0.3 \div 0.4)D. \quad (\text{Б.6})$$

- ширина вхідного патрубку в циклоні (Внутрішній розмір), м

$$b_1 = 0.2D. \quad (\text{Б.7})$$

- ширина вхідного патрубку на вході (Внутрішній розмір), м

$$b = 0.26D. \quad (\text{Б.8})$$

- довжина вхідного патрубку, м

$$l = 0.6D. \quad (\text{Б.9})$$

- висота вхідного патрубку (внутрішній діаметр), м

$$a = 0.66D. \quad (\text{Б.10})$$

- кут розкриття жалюзійного елемента, град

$$a = 30^{\circ} \dots 120^{\circ} \quad (\text{Б.11})$$

висота вихідної труби, м

$$h_T = 1.74D. \quad (\text{Б.12})$$

- висота циліндричної частини внутрішнього корпусу апарата, м

$$H_{\text{ц}} = 2,26D. \quad (\text{Б.13})$$

- висота конуса апарата, м

$$H_K = 2.0D. \quad (\text{Б.14})$$

- висота зовнішньої частини вихідної труби, м

$$b_T = 0.3D \quad (\text{Б.15})$$

- загальна висота апарата без бункера-накопичувача, м

$$H = 4.56D. \quad (\text{Б.16})$$

Розраховуємо коефіцієнт гідравлічного тертя:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{32\pi\nu R_2}{Q}, \text{Re} < \text{Re}_{kp}, \\ 0.3164 \left(\frac{\pi R_1 \nu}{2Q} \right)^{\frac{1}{4}}, \text{Re} > \text{Re}_{kp}. \end{cases} \quad (\text{Б.17})$$

Розраховуємо втрати тиску в апараті, Па

$$P = \rho \nu r \varphi \left[\frac{B \varphi Z}{2r} + A(B_0(r) + J_1(Kr)) e^{-KZ} \right], \quad (\text{Б.18})$$

$$\Delta P_1 = P \left(R_2 - \frac{a}{2}; 0; \frac{b}{2} \right) - P \left(R_1, \frac{\pi - \alpha}{2}, H_0 \right), \quad (\text{Б.19})$$

$$\Delta P_2 = \frac{8}{\pi^2} \lambda \frac{H_0}{2R_1} \rho \frac{Q^2}{(2R_1)^4} = \frac{\lambda H_0 \rho Q^2}{4\pi^2 R_1^5}, \quad (\text{Б.20})$$

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (\text{Б.21})$$

Якщо втрати тиску ΔP виявились задовільними, переходимо до розрахунку повного коефіцієнта очистки газу в апараті

$$\eta(\delta) = f(Stk, K), \quad (\text{Б.22})$$

$$\eta(\delta) = A \cdot Stk^B \cdot K^M, \quad (\text{Б.23})$$

$$\eta = \sum_{i=1}^{i=n} \eta_i(\delta) \varphi_i(\delta). \quad (\text{Б.24})$$

Висота зовнішнього корпусу може бути різною і залежить від особливостей проєктованої конструкції апарата.

Б.2 Таблиця ідентифікаторів програми розрахунку основних параметрів циклонного пиловловлювача

Найменування показників	Ідентифікатор	Одиниця вимірювання	Позначення
Об'єм очисного газу при робочих умовах	Q	м ³ /с	Q
Густина газу при робочих умовах	ρ_{Γ}	кг/м ³	$\rho_{\text{пов}}$
Густина пилу	$\rho_{\text{ч}}$	кг/м ³	ρ
Динамічна в'язкість газу при робочій температурі	μ	Па·с	ν
Медіанний діаметр частинок	d_m	м	δ
Площу перетину апарата	F	м ²	F
Діаметр внутрішнього корпусу апарата	D	м	D
Дійсну швидкість газу в апараті,	ω	м/с	ω
Внутрішній діаметр зовнішнього корпусу	$D_{\text{зовн}}$	м	$D_{\text{зовн}}$
Внутрішній діаметр вихідної труби	d	м	d
Внутрішній діаметр пиловипускного отвору	d_1	м	d_1
Ширина вхідного патрубку в циклоні	bl	м	bl
Довжина вхідного патрубку	l	м	l
Висота вхідного патрубку	a	м	a
Кут розкриття жалюзійного елемента	α	градус	α
Висота вихідної труби	h_{Γ}	м	h_{Γ}
Висота циліндричної частини внутрішнього корпусу апарата	$H_{\text{ц}}$	м	$H_{\text{з}}$
Висота конуса апарата	$H_{\text{к}}$	м	$H_{\text{к}}$
Висота зовнішньої частини вихідної труби	b_{Γ}	м	b_{Γ}
Загальна висота апарата без бункера-накопичувача	H	м	H
Коефіцієнт гідравлічного тертя	λ		λ
Втрати тиску в апараті	ΔP	Па	ΔP
Розрахунковий коефіцієнт	B		B
Фракційна ефективність вловлювання частинок	η_{δ}	%	$\eta(\delta)$
Загальна ефективність апарата	η	%	η

Б.3 Результати розрахунку основних конструктивних розмірів циклонного пиловловлювача.

$$Q := \frac{4000}{3600} \quad \omega_{\text{opt}} := 2.5$$

$$F_{\text{ww}} := \frac{Q}{\omega_{\text{opt}}} = 0.444$$

$$D := \sqrt{\frac{F}{0.785}} = 0.752$$

$$D_{\text{ww}} := 0.8$$

$$\omega := \frac{Q}{0.785 \cdot D^2} = 2.212$$

$$D_{\text{зовн}} := 1.24 \cdot D = 0.992$$

$$a := 0.66 \cdot D = 0.528 \quad b := 0.2 \cdot D = 0.16 \quad l_{\text{ww}} := 0.6 \cdot D = 0.48$$

$$d := 0.55 \cdot D = 0.44 \quad d_1 := 0.35 \cdot D = 0.28$$

$$h_T := 1.74 \cdot D = 1.392 \quad b_{\delta} := 0.3 \cdot D = 0.24$$

$$H_z := 2.26 \cdot D = 1.808 \quad H_k := 2 \cdot D = 1.6 \quad H_{\text{ww}} := 4.56 \cdot D = 3.648$$

$$H_0 := h_T \quad R_1 := \frac{d}{2}$$

$$g_{\text{ww}} := 9.81 \quad \delta_{\text{ww}} := 20 \cdot 10^{-6} \quad c_{\text{ww}} := 0.00052 \quad \varphi(\delta) := 95$$

$$\rho_{\text{пов}} := 1.2 \quad \rho := 3400 \quad \nu := 1.51 \cdot 10^{-5}$$

$$\lambda := 3.7$$

$$\Delta p_1 := 172.517 \quad \Delta p_2 := \frac{\lambda \cdot H_0 \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot Q^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot R_1^5} = 375.028$$

$$\Delta p := \Delta p_1 + \Delta p_2 = 547.545$$