

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота
другий магістерський
(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз сучасних методів розрахунку циклонів

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1449
спеціальності 144 теплоенергетика
(код і назва спеціальності)
освітньої програми 144 теплоенергетика
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

А.В. Лаврьонов

(ініціали та прізвище)

Керівник зав. каф., доцент, д.т.н. А.О. Чейлитко
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент доцент каф. ТГЕ., к.т.н. О.І. Осаул
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя
2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики
Рівень вищої освіти другий магістерський
Спеціальність 144 Теплоенергетика
(код та назва)
Освітня програма Теплоенергетика
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____
«09» грудень 2020 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Лаврьонова Андрія Вікторовича





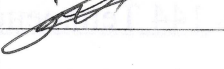
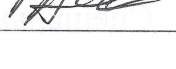
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз сучасних методів розрахунку циклонів
керівник роботи Чейлитко Андрій Олександрович, д.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «25» травня 2020 року №601-с

- 2 Строк подання студентом роботи 10.12.2020
- 3 Вихідні дані до роботи
- 4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) огляд існуючих методів пиловловлювання; розробка методу розрахунку, який вловлює здібності циклонів; аналіз сучасних методів розрахунку циклонів; конструкція та принцип роботи циклону; моделювання процесів пиловловлювання циклонів з перфорованою стінкою; вивчення охорони праці на підприємстві.
- 5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Аксонетрична схема пиловловлювача та схема вертикального розтину пиловловлювача

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Чейлитко А.О.		
2	Чейлитко А.О.		
3	Чейлитко А.О.		

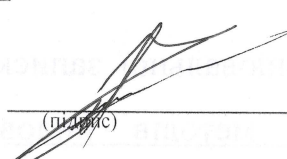
7 Дата видачі завдання 05 травня 2020 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд існуючих методів пилевловлювання	01.06.2020	
2	Аналіз сучасних методів розрахунку циклонів	01.09.2020	
3	Вивчення охорони праці на підприємстві	20.10.2020	
4	Оформлення роботи	01.12.2020	
5	Підготовка презентації та доповіді	10.12.2020	

Студент  (підпис)

А.В. Лаврьонов
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)  (підпис)

А.О. Чейлитко
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер  (підпис)

Ю.М. Каюков
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Лаврьонов А.В. Дослідження сучасних методів розрахунку циклонів.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник: доктор технічних наук, професор Чейлитко А.О. Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету. Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2021.

У роботі розглядаються і досліджуються сучасні методи розрахунку циклонів. На підставі знайденої інформації проводиться розробка основних аналітичних залежностей, які необхідні для побудування методики проведення експериментів та розрахунків пиловловлювання для конкретних умов роботи.

Розрахунки проводились на основі аналітичних досліджень і вирішувались шляхом математичного моделювання. Були приведені розрахунки нових конструкцій сучасних циклонів для отримання їх геометричних розмірів, опору та ефективності вловлювання пилу.

Сучасні циклони розроблені для більш ефективного видалення пилу з повітря при різних видах роботи. В даній роботі циклон відноситься до пиловідокремлювачів з високим коефіцієнтом корисної дії. Він використовується для уловлювання дорогого пилу: переробка або використання дорогих матеріалів і сплавів таких як срібло, вольфрам, молібден і ін.

Ключові слова: сучасний циклон, пиловловлювання, математичне моделювання.

Andrii V. Lavronov. Research of modern methods for calculating cyclones.

Master's Degree Graduate Thesis in specialty 144 – Heat Power Engineering, Research Supervisor: Doctor of Technical Sciences, Professor Cheilytko A.A. Engineering educational and scientific Institute of Zaporizhzhia National University. Department of Heat Power and Hydropower Engineering, 2021.

The work considers and investigates modern methods for calculating cyclones. Based on the information found, the basic analytical dependencies, necessary for constructing methods of conducting experiments and calculations of dust collection for specific working conditions, are developed.

The calculations were made on the basis of analytical studies and were solved by mathematical modeling. Calculations of new designs of modern cyclones for obtaining their geometric dimensions, resistance and dust capture efficiency were presented.

Modern cyclones are designed for more effective removing dust from the air during various types of work. In this paper, the cyclone refers to dust separators with a high efficiency. It is used to capture expensive dust: processing or using expensive materials and alloys such as silver, tungsten, molybdenum and others.

Keywords: modern cyclone, dust collection, mathematical modeling.

Лаврёнов А.В. Исследование современных методов расчета циклонов.

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 144 - Теплоэнергетика, научный руководитель: доктор технических наук, профессор Чейлытко А.А. Инженерный учебно-научный институт Запорожского национального университета. Кафедра теплоэнергетики и гидроэнергетики, 2021.

В работе рассматриваются и исследуются современные методы расчета циклонов. На основании найденной информации проводится разработка основных аналитических зависимостей, которые необходимы для построения методики проведения экспериментов и расчетов пылеулавливания для конкретных условий работы.

Расчеты проводились на основе аналитических исследований и решались путем математического моделирования. Были приведены расчеты новых конструкций современных циклонов для получения их геометрических размеров, сопротивления и эффективности улавливания пыли.

Современные циклоны разработаны для более эффективного удаления пыли из воздуха при различных видах работы. В данной работе циклон относится к

пылеотделителям с высоким коэффициентом полезного действия. Он используется для улавливания дорогой пыли: переработка или использование дорогих материалов и сплавов таких как серебро, вольфрам, молибден и др.

Ключевые слова: современный циклон, пылеулавливания, математическое моделирование.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПИЛЄВЛОВЛЮВАННЯ	9
1.1 Механічні знепилюючі пристрої	12
1.1.1 Пилоосаджувальні камери.....	12
1.1.2 Жалюзійні пиловловлювачі.....	15
1.2 Циклони.....	15
1.3 Апарати мокрого очищення газу	18
1.4 Фільтруючі апарати.....	24
1.4.1 Електрофільтри.....	26
1.5 Розробка методу розрахунку, який вловлює здібності циклонів	27
2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЦИКЛОНІВ	43
2.1 Конструкція та принцип роботи циклону.....	44
2.2 Розробка моделювання процесів пиловловлювання циклонів з перфорованою стінкою	49
2.3 Висновок аналітичних залежностей для розрахунку площі вузького перетину труби Вентурі.....	56
2.4 Висновок аналітичних залежностей по розрахунку перепаду тиску між бункером пиловловлювача і вузьким перетином труби Вентурі	68
2.5 Висновок аналітичної залежності для розрахунку перетоків з бункера на вихід в пиловловлювач через трубу Вентурі.....	71
3 ОХОРОНА ПРАЦІ НА ПІДПРИЄМСТВІ.....	76
3.1 Основні небезпечні і шкідливі фактори.....	76
3.2 Засоби захисту від небезпечних і шкідливих виробничих факторів.	77
ВИСНОВОК.....	79
ДЖЕРЕЛА ПОСИЛАНЬ.....	81

ВСТУП

Метою дипломної роботи була розробка основних аналітичних залежностей, які необхідні для побудування методики проведення експериментів та розрахунків пиловловлювання для конкретних умов роботи.

У зв'язку зі стратегією стійкого розвитку ООН, однією із трьох основних засад є екологія. В галузі теплоенергетики особливий інтерес набуває розробка та застосування нових, більш ефективних пилоочисних агрегатів, що допоможуть зменшити викиди в атмосферу та зберегти деякі дуже цінні ресурси для виробництва. Із зростанням нововведення в технологічні підприємства зростає кількість шкідливих викидів в атмосферу. Тим самими погіршується екологічний стан навколишнього середовища.

Об'єкт дослідження є циклони нової конструкції, для очищення від пилу.

Предмет дослідження є методи розрахунку циклонів, як вихрових апаратів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні задачі:

- аналіз літературних джерел за тематикою дослідження;
- дослідження роботи циклону для очищення повітря від пилу;
- розрахунок циклону для конкретних умов роботи.

Постановка задачі вирішувалась шляхом математичного моделювання на основі проведення аналітичних досліджень. В роботі використані основні теоретичні положення тепломасобміну та термодинаміки.

Теоретичні дослідження, виконані безпосередньо автором спільно з співробітником інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету. Автору належать основні ідея роботи, постановка завдання, обґрунтування основних припущень, теоретичні викладки та аналіз отриманих результатів і формулювання висновків за результатами проведених робіт.

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПИЛЕВЛОВЛЮВАННЯ

На промислових підприємствах проводиться очищення повітря, що подається не тільки в цехи, відділи, а й видаляється з них в атмосферу, щоб не допускати забруднення зовнішнього повітря на території підприємства та доданих до неї житлових кварталів.

Очищенню повітря від пилу піддають:

- зовнішнє припливне повітря при концентрації в ньому пилу, більше, ніж допускається нормами;
- внутрішній при підмішуванні його до зовнішнього повітря, причому змішане повітря, яке подається в приміщення не повинно містити пилу в кількості більше 30 % гранично допустимої концентрації;
- внутрішнє відпрацьоване повітря при видаленні його назовні.

Очищення повітря може бути:

- грубим - затримуються частинки пилу крупніше 100 мкм;
- середнім - затримуються частинки пилу розміром до 100 мкм при кінцевій кількості пилу в повітрі не більше 100 мг/м³;
- тонким - затримуються частинки пилу розміром до 100 мкм при кінцевій кількості пилу в повітрі до 1-2 мг/м³ [1].

Знепилюючі пристрої підрозділяються на пиловловлювачі та фільтри.

До пиловловлювачів відносять пристрої, в яких частинки пилу осідають під дією сили тяжіння і інерційних сил зі зміною швидкості і напрямку руху повітряного потоку. Такими пристроями є пилоосадкові камери, циклони, і інші апарати, що діють на основі відцентрових сил.

Фільтри являють собою пристрої, в яких запилене повітря очищається, проходячи через сітчасті або пористі матеріали (скляна вата, гравій, кокс, пористий папір, тканину, металева сітка і ін.).

Знепилюючі пристрої можуть бути не тільки сухими, а й мокрими. При застосуванні мокрих знепилюючих пристроїв ефективність очищення повітря від пилу підвищується. Для змочування застосовують воду і масло (скрубери з

зрошуваною насадкою і водяною плівкою, циклони-промивачі, пінні пиловловлювачі, масляні фільтри) [2].

До теперішнього часу розроблені як теоретичні основи вловлювання пилу і газових компонентів, так і методи розрахунку різноманітної апаратури для цих цілей, успішно експлуатується при знешкодженні промислових газоподібних викидів [3].

За принципом дії існуючі апарати для вловлювання пилу підрозділяються на наступні групи:

- механічні знепилюючі пристрої гравітаційно-інерційної дії, в яких пил виділяється з газу під дією маси частинок, інерції або відцентрових сил;

- фільтруючі апарати, в яких пил виділяється з газу шляхом фільтрації газового потоку через шар фільтруючої тканини або шар насипного зернистого матеріалу;

- промивні і рідко плівкові апарати, в яких тверді частинки виділяються з пилогазового потоку шляхом промивання газу рідиною або осадженням частинок пилу на рідинну плівку;

- електрофільтри, в яких частинки пилу осідають за рахунок іонізації газу і частинок пилу, які містяться в ньому.

Настільки ж різноманітна і апаратура, яка використовується для очищення газів, що відходять від багатьох хімічних газоподібних компонентів, що виділяються при здійсненні значного числа технологічних процесів в ряді виробництв.

До показників, що характеризують роботу того чи іншого знепилюючого пристрою, слід віднести:

- а) ступінь очищення (ефективність);
- б) продуктивність, $\text{м}^3/\text{год.}$, або питоме повітряне навантаження, $\text{м}^3/\text{год.}$ на 1 м^2 ;
- в) гідравлічний опір, Па;
- г) витрата електроенергії, кВт/год. на 1000 м^3 повітря;
- д) вартість очищення 1000 м^3 повітря.

У [4] було представлено декілька технологій очистки повітря від пилу. Особливу увагу приділили циклонному очищенню. Були показні методи, які засновані на теоретичних дослідях. Найбільш достовірні результати можна отримати завдяки експериментальним дослідям, які проводяться на фізичних моделях. Але для кожної конкретної конструкції потрібно проводити окремий експеримент. Більш спільні результати можливо отримати при використанні математичної моделі гідромеханічних процесів циклонів. Створення математичної моделі руху частинок пилу в закрученому потоці дозволить оцінити вплив різних факторів на ефективність управління пилу в циклонах.

Для визначення характеру руху частинок, що транспортуються потоком у закручених пилоповітряних потоках, та осадження їх на твердій поверхні потребує розрахунку динамічних рівнянь для турбулентного потоку і частинки використано метод розрахунку газодинамічних потоків, який комбінує властивості ейлерового та лагранжевого підходів, і дає змогу певною мірою усунути недоліки кожного - це метод „частинок у комірці” [5]. Було створено апроксимаційну модель руху частинок пилу в апараті, за допомогою якої ми зможемо для кожного типу аерозолу теоретично побудувати траєкторії його руху в апараті, маючи різні конструктивні параметри пиловловлювача, а в подальшому підібрати найбільш ефективний пиловловлювач для кожного конкретного виду технологічного виробництва. На характер руху частинок значний вплив мають умови їх контакту при ударі з поверхнею корпусу пиловловлювача [6], а при достатньо великих швидкостях руху можливе явище відбиття частинки пилу. Математичне моделювання процесу сепарації відображає взаємозв'язок процесу руху твердих частинок в апараті з його ефективністю, що дало змогу отримати траєкторію руху частинок на різних ділянках апарата, за якою розрахована його ефективність для кожного типу пилу, а це дає змогу для кожного типу аерозолу теоретично, маючи різні конструктивні параметри пиловловлювачів, підібрати найбільш ефективну конструкцію для кожного конкретного типу технологічного виробництва.

Ще одна нова циклонна установка має рельєфну поверхню з відривними зонами і зверненим вгору усіченим конусом, що володіє меншим, в 2 рази, аеродинамічним опором в порівнянні з гладкостінними. Зниженню гідравлічного опору циклону сприяє наявність відривних зон на рельєфних поверхнях [7]. Моделювання турбулентної течії газу в пиловловлювачі нового типу показує, що розрахунки картини перебігу в циклоні якісно задовільно узгоджуються з експериментальними даними; чисельні значення енергії турбулентних пульсацій для гладкостінних і нового типу циклонів задовільно узгоджуються з експериментальними даними по ефективності пиловловлювання цих пиловловлювачів; зниження гідравлічного опору циклону з внутрішніми елементами в порівнянні з гладкостінними апаратами відбувається внаслідок перебудови течії: зменшення тангенціальної швидкості з одночасним збільшенням аксиальної швидкості потоку в циклоні.

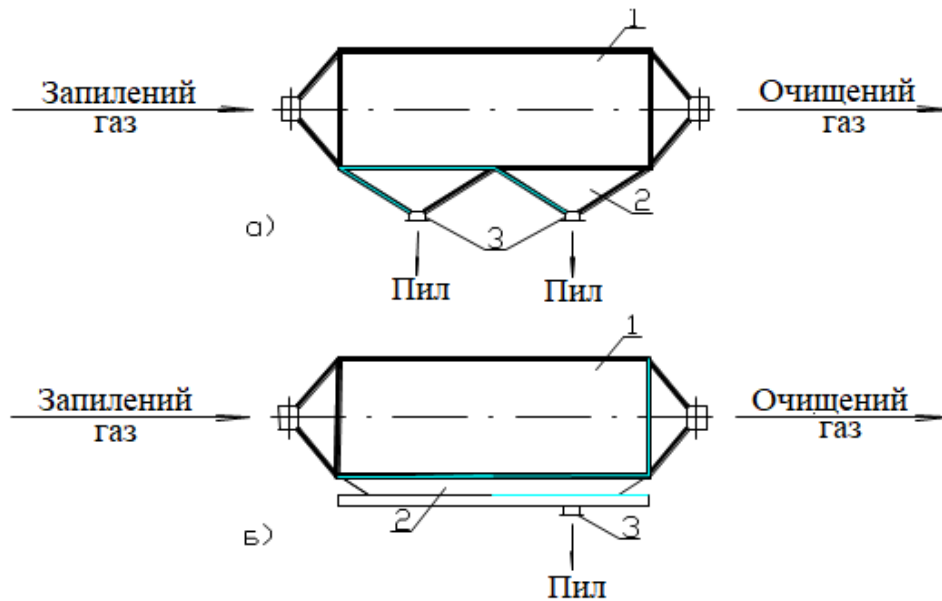
1.1 Механічні знепилюючі пристрої

Для очищення повітря від пилу, що видаляється витяжною вентиляцією, застосовують пиловловлювачі і фільтри. Вибір їх залежить від характеру пилу (від розміру пилинок і його властивостей; сухий, волокнистий, липкий пил і т.д.), цінності даного пилу і необхідного ступеня очищення.

До пиловловлювачів відносяться пилоосаджувальні камери, інерційні пиловловлювачі і циклони.

1.1.1 Пилоосаджувальні камери

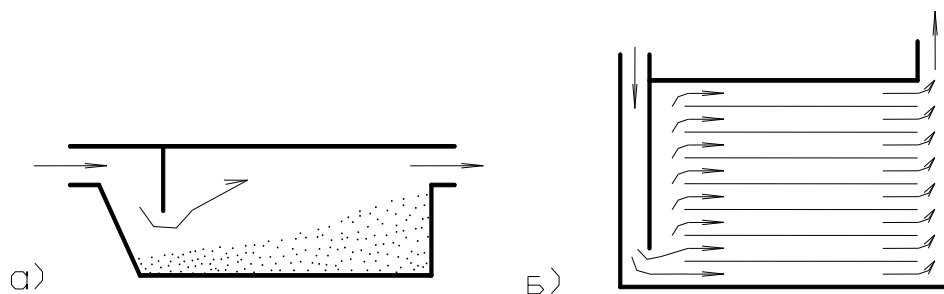
Найбільш простим пиловловлювачем для очищення повітря, що видаляється є пилоосаджувальні камери, робота яких заснована на осадженні пилинок повітря розміром 30...100 мкм. при малій швидкості їх руху ($\omega = 0,1 \text{ м/с}$). На рисунках 1.1, 1.2 та 1.3 представлені основні конструкції пилоосаджувальних камер [4].



а) порожниста; б) з горизонтальними полицями.

1 – корпус; 2 – бункер; 3 – штуцер для видалення пилу.

Рисунок 1.1 – Пилоосаджувальні камери



а) горизонтальна з вертикальною перегородкою; б) вертикальна з горизонтальними полицями.

Рисунок 1.2 – Пилоосаджувальні камери з перегородками

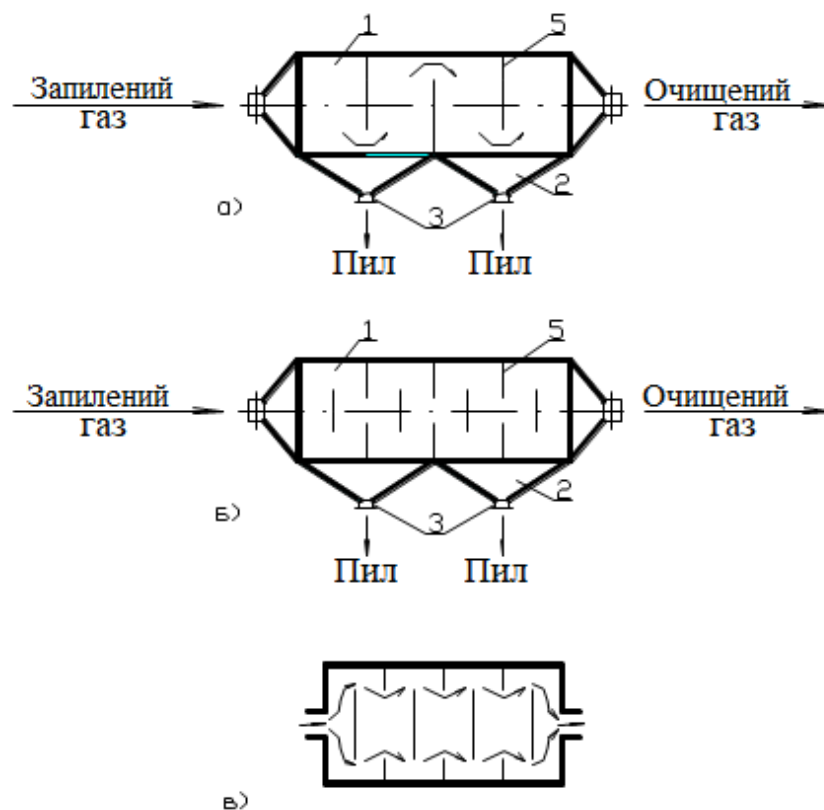
Принцип роботи пилоосаджувальних камер ґрунтується на виведенні частинок пилу з газопилового потоку шляхом їх осадження під дією сили ваги. Їх застосовують для уловлення великих частинок сировинних матеріалів після обертових цементних печей, печей для опалення магнезиту і доломіту тощо.

Перевагою пилоосаджувальних камер є простота виготовлення. Матеріалом для їх виготовлення є цегла, збірний залізобетон, сталь та дерево для холодних газів. Перевагою також є незначний гідравлічний опір 50...100 Па.

Недоліком є низька ефективність пилоуловлювання (40...50 %), особливо при вловленні дрібнодисперсного пилю ($d < 20$ мкм), а також їх громіздкість.

Серед наявних конструкцій пилоосаджувальних камер заслуговує увагу горизонтальна лабіринтова камера (рисунок 1.3), запропонована професором В.В. Батутіним. У цій оригінальній камері механічні домішки випадають в результаті різких змін напрямків потоку, ударів пилинок об перегородки і завихрення повітря.

Наявність вертикальних або горизонтальних перегородок до гравітаційного ефекту додає ефект інерційного осадження при обтіканні газовим потоком різних перешкод. В результаті збільшується ефективність роботи пилоосаджувальних камер.



1 – корпус; 2 – бункер; 3 – штуцер для видалення пилю; 5 – перегородки.

Рисунок 1.3 – Лабіринтові пилоосаджувальні камери

1.1.2 Жалюзійні пиловловлювачі

У жалюзійних пиловловлювачах, пил виділяється з газового потоку під дією інерційних сил при зміні напрямку руху газового потоку. За допомогою жалюзійних пластин або кілець, встановлених в газоході, потік газу поділяється на дві частини: на очищений та збагачений пилом газ.

Один потік становить 80 - 90 % усієї кількості газу і в значній мірі звільнений від пилу, інший складає 10 - 20 % і в ньому зосереджена основна маса пилу, яку вловлюють потім в циклоні або в іншому, досить ефективному пиловловлювачі. Рух газу через циклон здійснюється завдяки перепаду тиску на жалюзійній решітці. Оптимальна швидкість підведення газу до ґрат складає 12 - 20 м/с, тобто приблизно дорівнює швидкості газу в газоходах [5].

Перевагою жалюзійних пиловловлювачів є малий гідравлічний опір та порівняно невеликі розміри. Недоліком є швидкий занос пластин або кілець особливо при високій концентрації фракцій пилу із значним діаметром частинок.

1.2 Циклони

З інерційних апаратів найбільшого поширення набули циклони як більш ефективні і менш дорогі пиловловлювачі для грубої очистки газів, що видаляються. Цей вид пиловловлювача значно відрізняється від пилоосаджувальних камер як в конструктивному відношенні, так і за принципом дії.

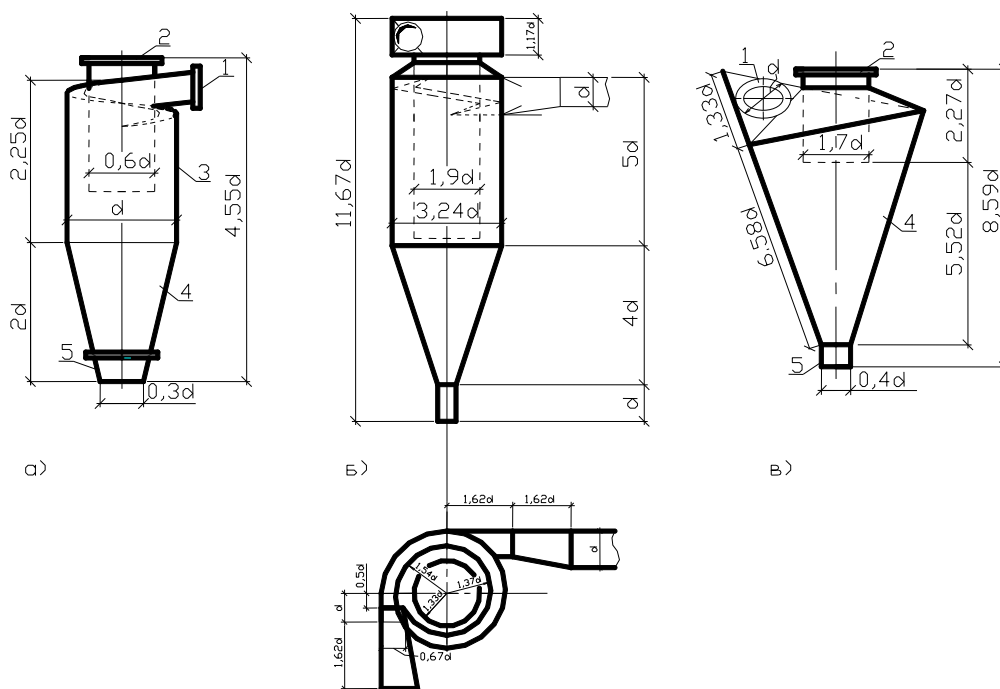
Циклони набули широкого поширення і застосовуються для затримування стружок, тирси та металевго пилу. Запилене повітря підводиться вентилятором в верхню частину зовнішнього циліндра циклону (рисунок 1.4).

В циклоні повітря приймає обертальний рух, внаслідок чого розвивається відцентрова сила, відкидаються механічні домішки до стінок, звідки вони скочуються в нижню частину циклону, що має форму усіченого конуса. Очищене

повітря через внутрішній циліндр циклону, так звану вихлопну трубу, виходить назовні. Нижня частина циклону періодично очищується [8].

Відмінною особливістю найпоширенішого циклону ЦН НПОгазу, (рисунок 1.4а) є похилий вхідний патрубок, який встановлюють під кутом 11° (ЦН-11), 15° (ЦП-15) і 24° (ЦН-24).

Крім циклонів НПОгазу досить широке застосування отримали також циклони типу ЛІОТ і СІОТ (рис. 1.4 б і 1.4 в).



а) відцентровий пиловідокремлювач-циклон; б) циліндричний циклон ЦН; в - циклі ЛІОТ; г) циклон СІОТ;

1, 2 – вхідний і вихідний патрубки; 3 – циліндрична частина циклону; 4 – конус; 5 – пиловідвідний патрубок; 6 – равлик, який розкручується.

Рисунок 1.4 – Основні типи циклонів

В циклоні ЛІОТ відділення пилу від повітря відбувається з використанням відцентрових сил, що виникають в обертовому потоці запиленого повітря, що опускається по гвинтовій лінії. Частинки пилу віджимаються до стінок і

спускаються вниз. Повітря, яке пройшло очистку, виходить через центральну трубу. Ефективність очищення до 85 %.

Крім звичайних циклонів в промислових підприємствах застосовуються групи з 2, 3, 4 циклонів. На теплових станціях для попереднього очищення в комплексі з іншими методами золовловлювання встановлюють мультициклони (рисунок 1.5) [9].

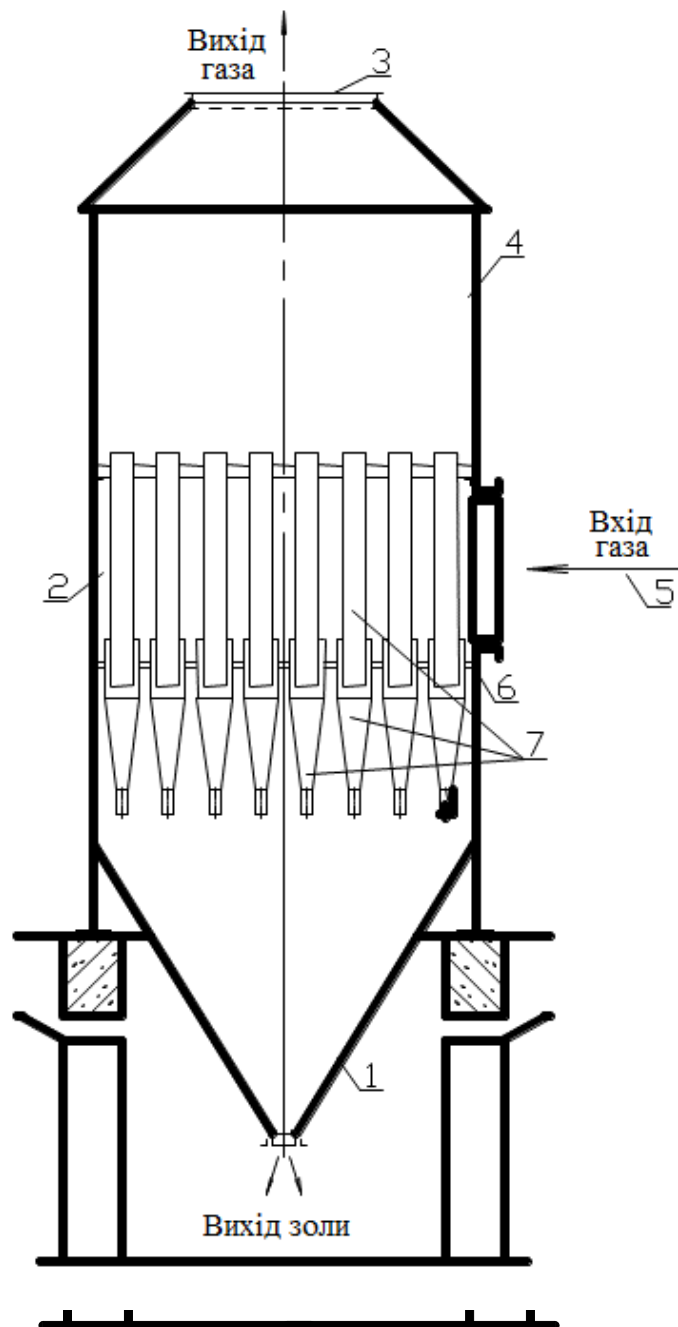


Рисунок 1.5 - Схема мультициклона

Мультициклон являє собою об'єднання в одному агрегаті багатьох маленьких циклонів діаметром 300 - 400 мм із загальною подачею в них забрудненого повітря і загальним бункером для золи, яка осіла. У мультициклоні затримується до 65 – 70 % золи.

Перевагою циклонів є:

- відсутність рухомих частин в апараті;
- надійне функціонування при температурах газів майже до 500 С;
- можливість вловлювання абразивних матеріалів при захисті спеціальним покриттям внутрішньої поверхні;
- простота виготовлення конструкції;
- незалежність роботи апарату від тиску газу;
- незалежність фракційної ефективності очищення від зростання запиленості газів;
- висока продуктивність при порівняно низькій вартості.

Недоліком є те, що значний гідравлічний опір 1250...1500 Па високоефективних циклонів призводить до поганого вловлювання частинок розміром менше 5 мкм.

1.3 Апарати мокрого очищення газу

Інтерес представляють пиловловлювачі мокрого типу, які відрізняються гарною ефективністю. До них відносяться відцентрові скрубери, циклоні-промивачі, пиловловлювачі Вентурі, пінні пиловловлювачі та інші.

Сили інерції, що діють на частинку пилу й краплини рідини при їх зближенні, залежить від маси частинок й краплинок та швидкості їх руху. Частинки пилу менше 1 мкм не мають достатньої кінетичної енергії і при зближенні обгинають краплинки, тобто не вловлюються рідиною. Броунівський рух характерний для частинок менше 1 мкм.

Значної ефективності очищення газових викидів від пилу за рахунок броунівського руху можна досягти шляхом зменшення швидкості руху газового потоку.

Вловлювання пилу в апаратах мокрого очищення газу відбувається в основному двома способами: захоплення частинок пилу краплями і захоплення частинок пилу плівкою рідини [10].

Відповідно до першого способу, пиловий потік промивають рідиною, яка диспергує: частинки пилу захоплюються краплями рідини і осідають. При цьому одночасно можливо випаровування крапель зрошувальної рідини або конденсація парів з газового потоку, а частинки пилу можуть служити ядрами конденсації пари. Завдяки цьому конденсаційному ефекту значно поліпшуються умови для осадження частинок пилу.

В апаратах, що працюють за другим способом очищення газу, вловлювання пилу відбувається шляхом подачі пилогазового потоку на поверхню рідини, або на змочену рідиною стінку апарату, або плівку газових бульбашок в рідині.

Циклон з водяною плівкою (рисунок 1.6) являє собою циліндр з листової сталі з нижнім підведенням забрудненого повітря. У верхній частині циліндра вода, що витікає через сопла, встановлені на кільцевому трубопроводі, омиває внутрішню частину циліндра. Витрата води 0,2 - 0,3 кг на 1м³ повітря, що очищається. Швидкість у вхідному патрубку 18 - 20 м/с. Ефективність очищення 99 % [11].

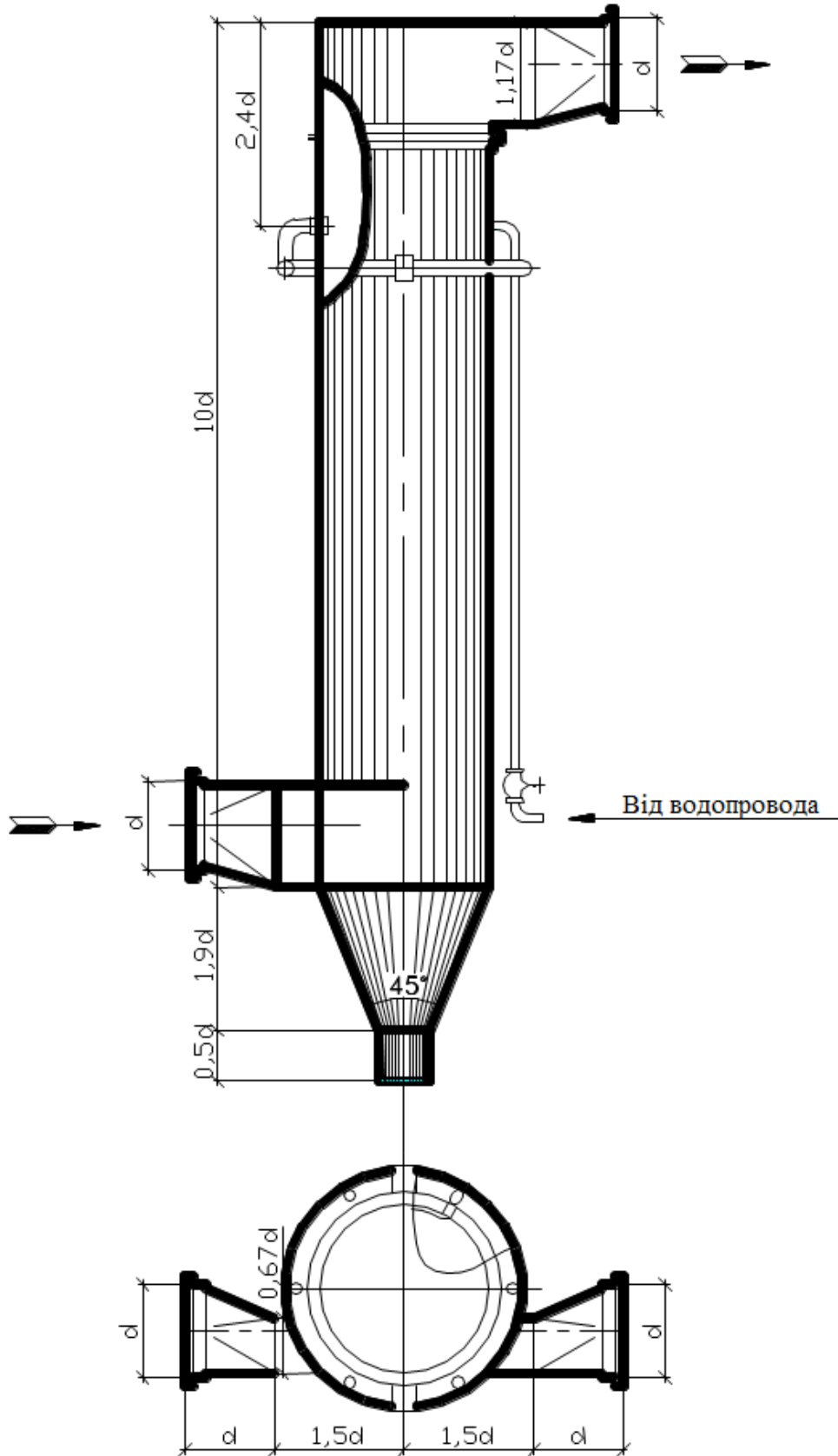


Рисунок 1.6 - Циклон з водяною плівкою

У загальному випадку при падінні крапель води під дією сил гравітації в робочому просторі апарата швидкість кінематичної коагуляції частинок пилу з газового потоку визначається за рівнянням

$$N_{кин} = \eta_3^1 \frac{\pi d_k^2}{4} w_0 Z, \quad (1.1)$$

де $N_{кин}$ - число частинок пилу, захоплених краплею за 1 с;

η_3^1 - коефіцієнт захоплення;

d_k - діаметр краплі диспергованої рідини, м;

w_0 - швидкість руху краплі щодо частки пилу, м/с;

Z - концентрація пилу

В даний час немає єдиної системи класифікації мокрих газоочисних апаратів.

За способом дії вони зазвичай діляться на наступні групи:

- порожнисті і насадкові газопромивачі (зрошувальні пристрої, промивні камери, порожнисті, форсункові, каскадні і насадкові скрубери);
- барботажні і пінні апарати;
- мокрі апарати ударно-інерційного типу;
- мокрі апарати відцентрової дії;
- динамічні газопромивачі (механічні скрубери; дезінтегратори);
- мокрі швидкісні газоочисні апарати.

Залежно від способу диспергування рідини мокрі газоочисні апарати ділять на три групи:

1) форсункові скрубери, де діопергіровання (розсіювальння) рідини здійснюється за допомогою форсунок, за рахунок енергії насоса;

2) скрубери Вентурі, в яких дроблення рідини здійснюється за рахунок енергії турбулентного потоку;

3) динамічні газопромивачі, де розбризування рідини здійснюється за рахунок механічної енергії ротора.

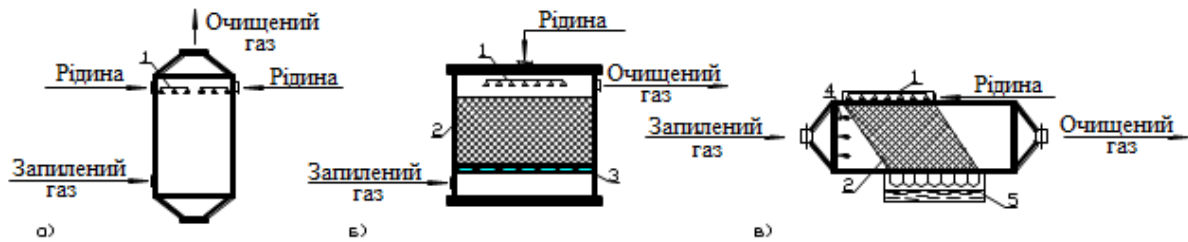
Пилоочищення рідиною реалізується в мокрих газопромівачах та барботажних скруберах. Їх перевага полягає:

- в невеликій вартості при високій ефективності;
- в можливості очищення газів при високій температурі та вологості вловлюваного пилу, а також при небезпеці загорань і вибухів очищених газів;
- в можливості разом з пилом вловлювати пароподібні та газоподібні компоненти;
- в можливості очищення газів від частинок розміром 0,1 мкм;
- в значній продуктивності, що знаходиться в межах 100...200 тис.м³/год..

Недоліками є:

- необхідність переробки шламу;
- можливість виносу краплин рідини та осадження їх разом з пилом в газоходах та димососах;
- необхідність захищати антикорозійними матеріалами апаратуру та комунікації в разі очищення агресивних газів.

Порожнинні і насадкові апарати. Порожнинні апарати призначені для очищення газу від достатньо великих частинок пилу (розмірами більше 5 мкм) та їх охолодження. Насадкові апарати використовуються для уловлювання тонкого пилу у вигляді туманів, добре розчиненого пилу, а також при спільному протіканні процесів пиловловлювання, охолодженні газів та абсорбції. У цих апаратах газу, які очищуються, пропускаються через потік рідини, яка розпилюється, розбризкується або стікає по насадці (рисунок 1.7). При цьому частинки пилу захоплюються потоками промивної рідини і осідають в апараті, а очищені газу виводяться в атмосферу [12].



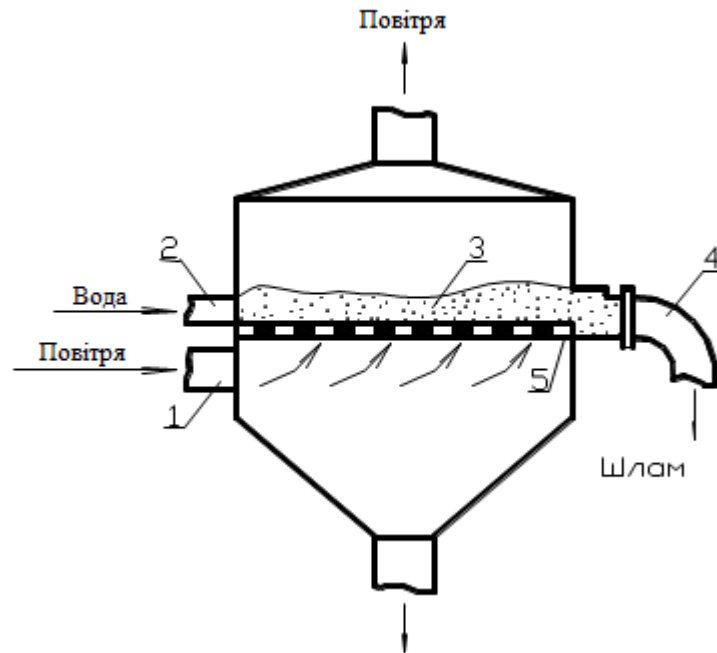
а) порожнистий скруббер; б) протиточний насадок скруббер; в) насадок скруббер з поперечним зрошенням;

1 – зрошувальний пристрій; 2 – насадка для вловлювання крапель; 3 – опорна решітка; 4 – форсунки; 5 – шламозбірник.

Рисунок 1.7- Порожнинні та насадкові газопромивачі.

У порожнинних скрубберах промивку газу здійснюють шляхом розбризування рідини назустріч очищеному потоку, який рухається і рідше – по ходу або поперек руху газу. Для зрошення скрубберів застосовують форсунки грубого розпилювання. Висока ефективність очищення газів досягається в тому випадку, якщо промивна рідина розпилюється з утворенням крапель розміром 0,5 – 1 мм.

На рисунку 1.8. показана схема пристрою пінного пиловловлювача. Принцип його дії заснований на проходженні повітряних струменів через водяну плівку. Встановлюють їх в опалювальних приміщеннях для очищення повітря від пилу з початковою забрудненістю понад 10 г/м^3 .

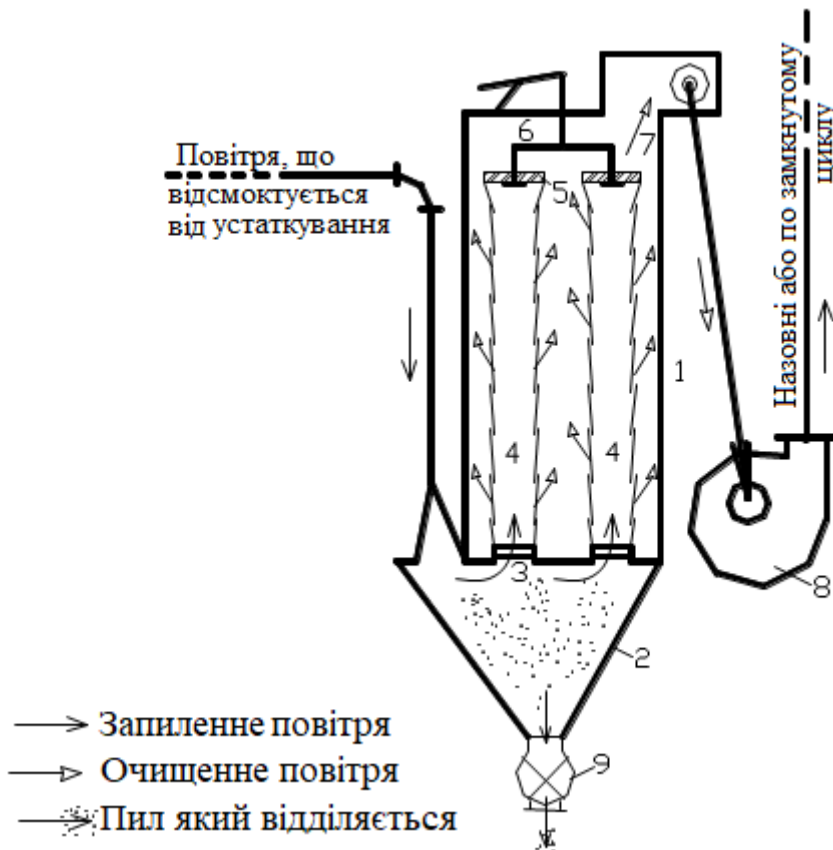


1 – патрубок; 2 – штуцер для подачі води; 3 – водяна плівка; 4 – трубопровід для відводу шламу; 5 – решітка.

Рисунок 1.8 - Пінний пиловловлювач

1.4 Фільтруючі апарати

Для середнього і тонкого очищення запиленого повітря з успіхом застосовують матерчаті фільтри, наприклад рукавний фільтр, схема якого показана на рисунку 1.9.



1 – металевий корпус; 2 – конічна частина корпусу для збору відокремлюваного пилю; 3 – днище з отворами для рукавів; 4 – рукави з ворсистої тканини; 5 – заглушки рукавів; 6 струшуючий механізм; 7 – отвір для виходу очищеного повітря; 8 – вентилятор; 9 – шлюзовий затвор.

Рисунок 1.9 – Схематичний розріз всмоктуючого матерчатого рукавного фільтра

У рукавних фільтрах зі струменевою продувкою уздовж рукава вгору і вниз переміщається порожнисте кільце зі щілиною шириною 0,2 - 2 мм.

Стиснене повітря, що виходить через кільцеву щілину під тиском 500-600 кПа і зі швидкістю 10 – 30 м/с, руйнує шар пилю, що осів всередині рукава.

Рукавні фільтри, набули поширення в багатьох галузях промисловості і особливо в тих, де пилю міститься в очищеному повітрі, представляє цінний продукт виробництва (дорогоцінні метали, борошно, цукор та інше). Вони використовуються для очищення неагресивних, не схильних до злипання й

утворення вибухонебезпечних сумішей та конденсату газопилових сумішей від твердих частинок при температурі до 300 °С [13].

Як фільтрувальні матеріали використовуються тканини:

- з натуральних волокон (бавовна, льон, вовна, шовк);
- з синтетичних волокон (капрон, лавсан, нітрон, тефлон, оксалон і інші тканини);
- з склотканини.

До тканин пред'являються наступні загальні вимоги:

- 1) забезпечення високого ступеня вловлювання при відносно невисокому гідравлічному опорі;
- 2) тривалий термін служби, який визначається механічними властивостями тканини, а також її хімічної і термічної стійкістю при робочих умовах;
- 3) можливо низька вартість.

1.4.1 Електрофільтри

Крім розглянутих видів обезпилюючого обладнання слід відзначити електрофільтри і ультразвукові пиловловлювачі. Принцип дії електрофільтру заснований на тому, що пилові частинки, проходячи з повітрям через електричне поле, отримують заряди і, притягуючи, осідають на електродах, з яких потім видаляються механічним способом [14]. На загальний ступінь очищення в електрофільтрах суттєво впливає електронний вітер. Електронний вітер створюється іонами газу з полярністю, що протилежна полярності корону вального електрода. Ці іони утворюються під впливом крони і є одночасно її частиною. Внаслідок передавання кількості руху від іонів газу, що рухаються в електростатичному полі, обертовим частинкам газу між електродами, який називається електронним або іонним вітром. Швидкість електронного вітру в апаратах 0,3 ... 0,6 м/с, а найбільша локальна швидкість може досягати 3 м/с.

Ступінь очищення в електрофільтрі визначається способом і режимом регенерації електродів. В сухих електрофільтрах для видалення пилу з

осаджувальних та корону вальних електродів застосовується пружинно-кулачкова, ударно-молоткова, магнітно-імпульсна та вібрацій система струшування. Для видалення осаджених твердих частинок в мокрих електрофільтрах використовують безперервне або періодичне промивання електродів з подачею на них необхідної кількості промивної води, що змиває осаджений пил.

В ультразвукових пиловловлювачах використовується здатність пилових частинок під дією потужного звукового потоку до коагуляції, тобто до згортання в пластівці, що дуже важливо для уловлювання з повітря аерозолів. Ці пластівці випадають в бункер. Звуковий ефект створюється сиреною. Сирени, які випускаються, можуть бути застосовані в пилоочисних установках продуктивністю до 15000 м³/год..

Описані пристрої для очищення повітря, цехів і відділів промислових підприємств, що видаляється витяжною вентиляцією в атмосферу, далеко не вичерпують всі види пиловловлювачів і фільтрів, які використовуються для запобігання забруднення повітряного басейну міст [15].

Незважаючи на існуюче різноманіття очисних апаратів в даний час для очищення газів від пилу найбільшого поширення знайшли циклони завдяки їх низькій вартості, простоті і зручності експлуатації. У зв'язку з цим розробка перфорованого циклону вимагає проведення досліджень, спрямованих на підвищення ступеня вловлювання пилу з газів, що і розглядається в даній роботі.

1.5 Розробка методу розрахунку, який вловлює здібності циклонів

Основною характеристикою при роботі пиловловлювачів є ефективність знепилювання газу, звана іноді коефіцієнтом корисної дії. Ефективність знепилювання – це відношення кількості пилу, відокремленого (вловлюваного) даними пиловловлювачами, до загальної кількості пилу, що міститься в знепилюючому газі.

Розрізняють два види коефіцієнта ефективності пиловловлювачів:

а) загальну вагову ефективність – відношення ваги всього вловлюваного пилу до загальної ваги пилу, що міститься в газі;

б) фракційну ефективність – відношення ваг вловлюваного і пилу даної фракції, який надійшов в циклон.

Як один, так і другий ККД характеризують здатність вловлювання циклоном і чим вище ККД циклону, тим він кращий [16].

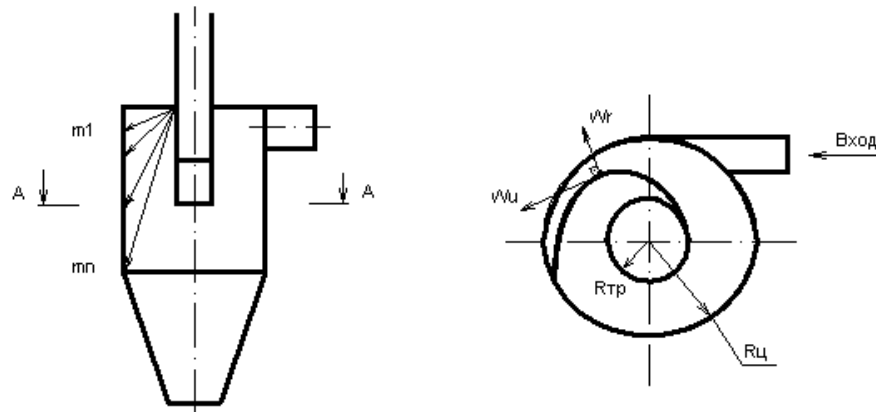


Рисунок 1.10 – Схема дії сил на частку в циклонічній камері

В даний час прийнято вважати, що частка пилу, що досягла стінки циклонічної камери буде вловлена циклоном. На підставі цієї передумови і будується вся теорія розрахунку ефективності вловлювання циклонів.

При розгляді питання взаємодії рідини з часткою, що знаходиться в циклонічній камері, застосовується той же підхід, що й у випадку вільного падіння частки. З огляду на те, що на частку, що знаходиться в циклонічній камері діє відцентрова сила (так як частка обертається разом з потоком навколо вертикальної осі циклонічної камери), то роль сил ваг тут грають відцентрові сили, які призводять до виникнення радіальної швидкості частки W_r . Відцентрова сила врівноважується опором потоку, і частинка рухається від центру до периферії циклону зі швидкістю W_r за інерцією.

При обтіканні частинки діаметром d ламінарним потоком сила опору визначиться

$$P = \frac{24}{\text{Re}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2} = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \rho \cdot \nu \cdot W. \quad (1.2)$$

Так як добуток $\rho \cdot \nu = \mu$ - коефіцієнту динамічної в'язкості, то сила опору при обтіканні кульового тіла ламінарним потоком визначиться рівнянням, що виражає закон Стокса, тобто

$$P = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot W_r. \quad (1.3)$$

Умова врівноваження відцентрової сили силами опору записують в наступному вигляді

$$F_{\frac{u}{\delta}} = \frac{m \cdot W_{ui}^2}{2} = P = 3 \cdot \pi \cdot d \cdot \mu \cdot W_r, \quad (1.4)$$

де m – маса частинки, що обертається навколо осі на відстані R_i зі швидкістю W_{ui} , звідки швидкість кульової частинки масою $m = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_m$ визначиться за наступним виразом

$$W_{ri} = \frac{d^2 \cdot W_{ui} \cdot \rho_m}{18 \cdot R_i \cdot \mu}. \quad (1.5)$$

Вважаючи, що шлях частинки в циклонічній камері при русі її в радіальному напрямку визначається різницею $R_y - R_{mp}$, знаходять час, за який частка досягає стінки циклону за такою залежністю

$$\tau = \frac{R_y - R_{mp}}{W_r}, \quad (1.6)$$

де W_r визначається з (1.5) за умови, що $R_i = R_{cp} = \frac{R_{mp} + R_u}{2}$, $W_{ui} = W_{usc} = W_u$, тоді

$$\tau = \frac{9 \cdot \mu \cdot (R_u^2 - R_{mp}^2)}{d^2 \cdot W_u^2 \cdot \rho_m}, \quad (1.7)$$

звідки діаметр частинок, які за час τ досягнуть стінки циклонічної камери і будуть схоплені, визначиться

$$d = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot (R_u^2 - R_{mp}^2)}{W_u^2 \cdot \rho_m \cdot \tau}}. \quad (1.8)$$

Час перебування частинки в апараті повинен перевищувати час, необхідний для досягнення часткою внутрішньої поверхні циклону, тобто $\tau > \tau_0$,

де $\tau = \frac{V_p}{Q} = \frac{\text{робочий} \cdot \text{об'єм} \cdot \text{циклону}}{\text{його} \cdot \text{об'ємна} \cdot \text{продуктивність}},$

$$\tau_0 = \frac{18 \cdot \mu}{d^2 \cdot W^2 \cdot \rho_m} \cdot \ln \frac{D_u}{D_{mp}}. \quad (1.9)$$

Аналізуючи існуючий підхід до вирішення питання сепаруючої здатності циклонів, можна сказати, що визначення середньої швидкості руху частинки в радіальному напрямку шляхом заміни в (1.5) R_i на R_{cp} , а W_{ui} на W_{usc} є не зовсім коректним, так як

$$W_r = \frac{1}{R_u - R_{mp}} \int_{R_{mp}}^{R_u} W(r) dr, \quad (1.10)$$

Розглядаючи лінійний закон зміни W_r в напрямку від R_{mp} до R_u середню швидкість в радіальному напрямку можна визначити

$$W_r = \frac{W_{rm} + W_{ry}}{2}, \quad (1.11)$$

де відповідно до (1.5)

$$W_{rm} = \frac{d^2 \cdot W_{um}^2 \cdot \rho_m}{18 \cdot \mu \cdot R_{mp}}, \quad (1.12)$$

$$W_{ry} = \frac{d^2 \cdot W_{um}^2 \cdot \rho_m}{18 \cdot \mu \cdot R_y}, \quad (1.13)$$

звідки

$$W_r = \frac{d^2 \cdot \rho_m}{36 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{W_{um}^2}{R_{mp}} - \frac{W_{uy}^2}{R_y} \right). \quad (1.14)$$

Ухвалюючи закон закрутки по радіусу в циклонічній камері, отримаємо

$$W_{um} = W_{usc} \cdot \frac{R_{cp}}{R_{mp}}, \quad (1.15)$$

$$W_{uy} = W_{usc} \cdot \frac{R_{cp}}{R_y}. \quad (1.16)$$

Замінивши в (1.16) W_{um} і W_{uy} на їх значення з (1.15) і (1.16) отримаємо середнє значення швидкості при русі частинки від радіуса труби до стінки камери

$$W_r = \frac{d^2 \cdot \rho_m}{36 \cdot \mu} \cdot W_{usc}^2 \cdot R_{cp}^2 \cdot \frac{R_y^3 + R_{mp}^3}{R_{mp}^3 \cdot R_y^3}. \quad (1.17)$$

З огляду на це час руху частинки від труби до стінки циклону визначиться за такою залежністю:

$$\tau = \frac{R_y - R_{mp}}{W_r} = \frac{R_y - R_{mp}}{R_y^3 + R_{mp}^3} \cdot \frac{36 \cdot \mu}{d^2 \cdot \rho_m} \cdot \frac{R_{mp}^3 \cdot R_y^3}{W_{ucc}^2 \cdot R_{cp}^2} \quad (1.18)$$

Відповідно до рисунка 1.5 маємо

$$L = (R_y - R_{mp}) \cdot tg\beta, \quad (1.19)$$

де $tg\beta = \frac{W_{1a}}{W_r}$ або $L = \frac{R_y - R_{mp}}{W_r} \cdot W_{1a} \cdot \tau \cdot W_{1a}$.

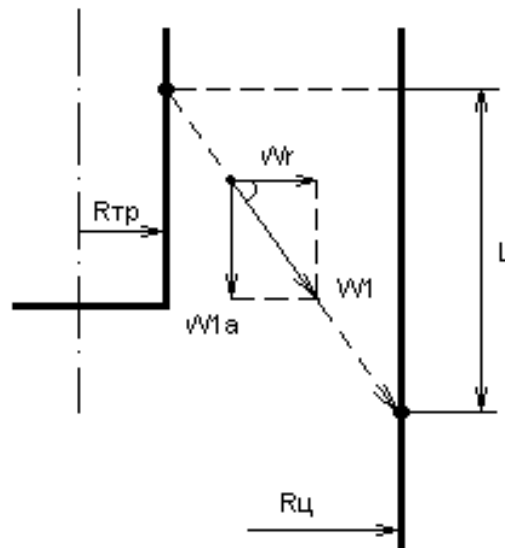


Рисунок 1.11 – Схема руху частинки в циклонічній камері

Звідки час перебування частинки в циклонічній камері, що характеризується кинематичним шляхом частинки стінки камери

$$\tau = \frac{L}{W_{1a}} = \frac{L}{\frac{W_0 \sum f}{\pi(R_y^2 - R_{mp}^2)}} = \frac{\pi(R_y^2 - R_{mp}^2) \cdot L}{W_0 \sum f}, \quad (1.20)$$

де L – довжина циклонічної камери, в якій відбувається вловлювання пилю.

З спільного вирішення рівнянь (1.18) і (1.20), мінімальний діаметр вловленого пилю

$$d_{\min} = \frac{6R_y}{\varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\rho_m} \cdot \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \frac{1}{R_0/R_y} \cdot \frac{1}{W_0} \cdot \frac{\left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4 \cdot \frac{1}{\cos \beta}}{\left[1 + \frac{R_{mp}}{R_y} + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4\right] \cdot L_y}}, \quad (1.21)$$

де β – кут нахилу вхідного патрубку до горизонту.

Довжина вихривий камери, необхідна для вловлювання частинок діаметром d_{\min} визначиться з (1.21) за такою залежністю

$$L_y = \frac{9D_y^2}{\varepsilon^2} \cdot \frac{\mu}{\rho_m} \cdot \frac{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4}{W_0 \cdot \frac{R_0}{R_y} \cdot \left[1 + \frac{R_{mp}}{R_y} + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4\right] \cdot d_{\min}^2 \cdot \cos \beta}. \quad (1.22)$$

З (1.21) отримаємо залежність, що визначає зв'язок між геометричними розмірами циклонами і його здатністю вловлювати частинки діаметром d_{\min} в наступному вигляді

$$d_{\min} = \frac{3D_y}{\varepsilon^4 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\mu_{\text{газ}}}{\rho} \cdot \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta}}{\varphi_0 \cdot \left(1 - \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \frac{1}{4tg\alpha_1 \cdot \frac{1}{\varepsilon}}\right) \cdot \cos \alpha_1} \cdot \frac{1}{L_y} \cdot \frac{\left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4}}{\left[1 + \frac{R_{mp}}{R_y} + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4\right]}, \quad (1.23)$$

де α_1 – кут крутки в перетискачі або в газовідвідній трубі.

Відносна довжина вихрової камери, необхідна для вловлювання частинок розміром d_{min} визначиться наступним виразом

$$\frac{L_u}{D_u^2} = \frac{9}{\varepsilon^2} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \cdot \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_n \cdot \cos \beta}}{\varphi_0 \left(1 - \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_n \cdot \cos \beta} \cdot \frac{1}{4tg\alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \cos \alpha_1} \cdot \frac{\left(\frac{R_{mp}}{R_u} \right)^4}{\left[1 + \frac{R_{mp}}{R_u} + \left(\frac{R_{mp}}{R_u} \right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_u} \right)^4 \right]} \cdot d_{min}^2. \quad (1.24)$$

Із залежності (1.23) видно, що вловлювана здатність циклону визначається його геометричним комплексом, довжиною вихрової камери, параметрами газу, щільністю пилу, розмірами газовідвідної труби, перепадом тиску в циклоні, діаметром вихрової камери і втратами початкового моменту кількості руху.

Із залежності (1.23) випливає, що зі збільшенням діаметра циклону D_u сепаруюча здатність його погіршується, тобто збільшується діаметр частинок пилу, які вловлюються циклоном. При цьому залежність лінійна. Це підтверджується досвідченими даними, отриманими на серії циклонів типу «ЦН» і показаними на рисунок 1.12. З рисунку видно, що з ростом діаметра однотипного циклону, його ККД зменшується лінійно. Це справедливо для геометрично подібних циклонів, якими є циклони серії «ЦН» і у яких $\frac{L_u}{D_u} = const$, то, відповідно до (1.24), буде витриманий і $d_{min} = const$, отже, у таких циклонів не повинно спостерігатися зниження ККД зі збільшенням діаметра циклону. Однак слід пам'ятати, що зі збільшенням діаметра циклону довжина його зростає пропорційно квадрату діаметра, тобто $L_u = const \times D_u^2$, тому циклони з $D_u > 1m$ мають довгу вихрову камеру.

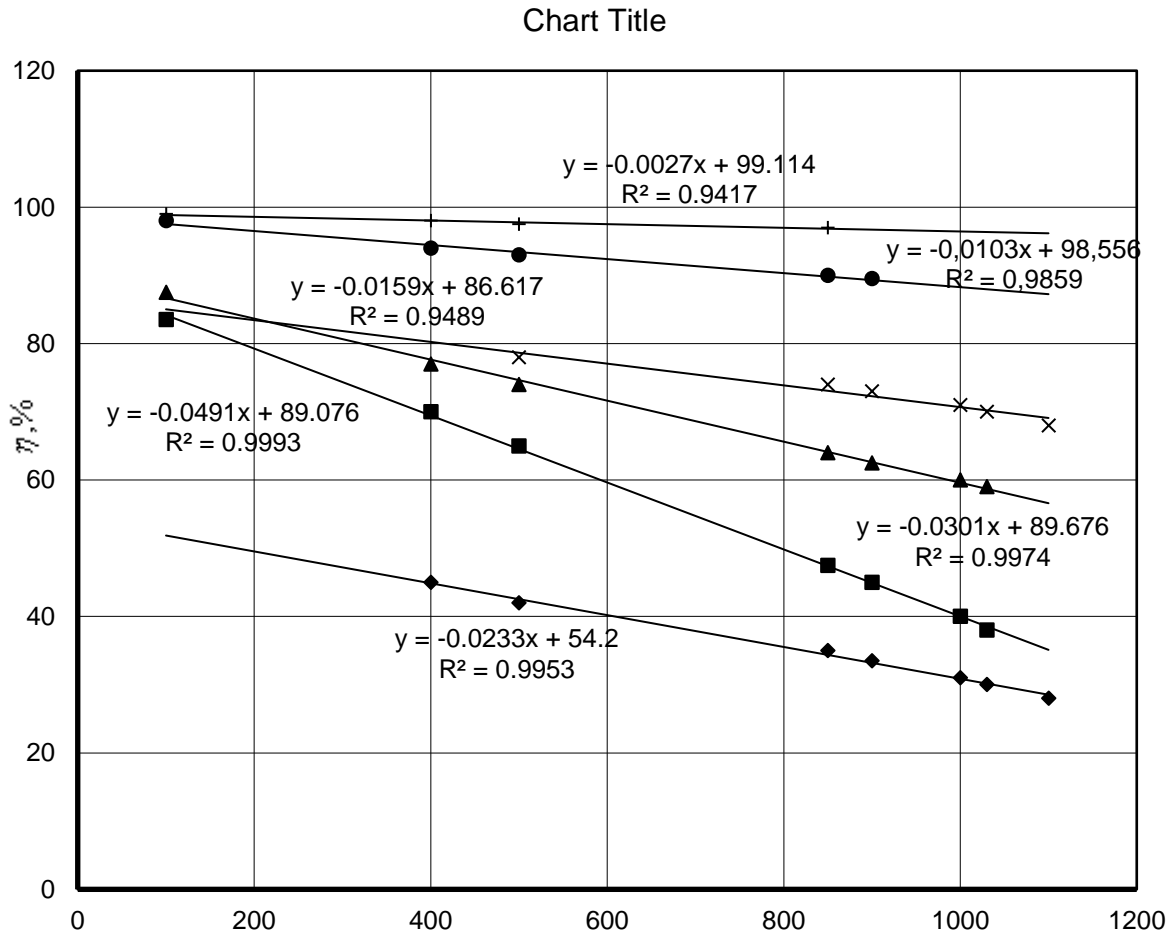
Зміна перепаду тиску на циклоні мало позначається на його сепаруючій здатності, так як відповідно до (1.23) $d_{min} = f(\sqrt[4]{\Delta P})$, хоча при збільшенні ΔP сепаруюча здатність циклону повинна поліпшуватися, якщо при цьому не буде

збільшуватися вторинне винесення, яке притаманне усім існуючим в даний час циклонам.

Великий вплив на сепаруючу здатність циклонів надають втрати моменту кількості руху, що враховуються в (1.23) коефіцієнтом ε . Особливо це проявляється при розрахунку довжини циклону при вловлюванні пилу діаметром $d_{\min} \leq 5 \mu\text{м}$, так як $L_y = f\left(\frac{1}{d_{\min}^2}, \frac{1}{\varepsilon}\right)$, що призводить до неймовірно великих довжин.

Але для вибору довжини в кожному випадку треба виконувати варіантні розрахунки.

Таким чином, по залежності (1.23) можна визначити мінімальний діаметр частинок пилу, який вловлюється в циклоні, або по заданому мінімальному діаметру пилинок, які вловлюються в циклоні, по (1.24) визначити необхідну для цих цілей довжину вихрової камери.



Циклон ЦН-15:

- – пил розміром 5 мкм;
- * – пил розміром 10 мкм;
- + – пил розміром 15 мкм.

Циклон ЦН-11:

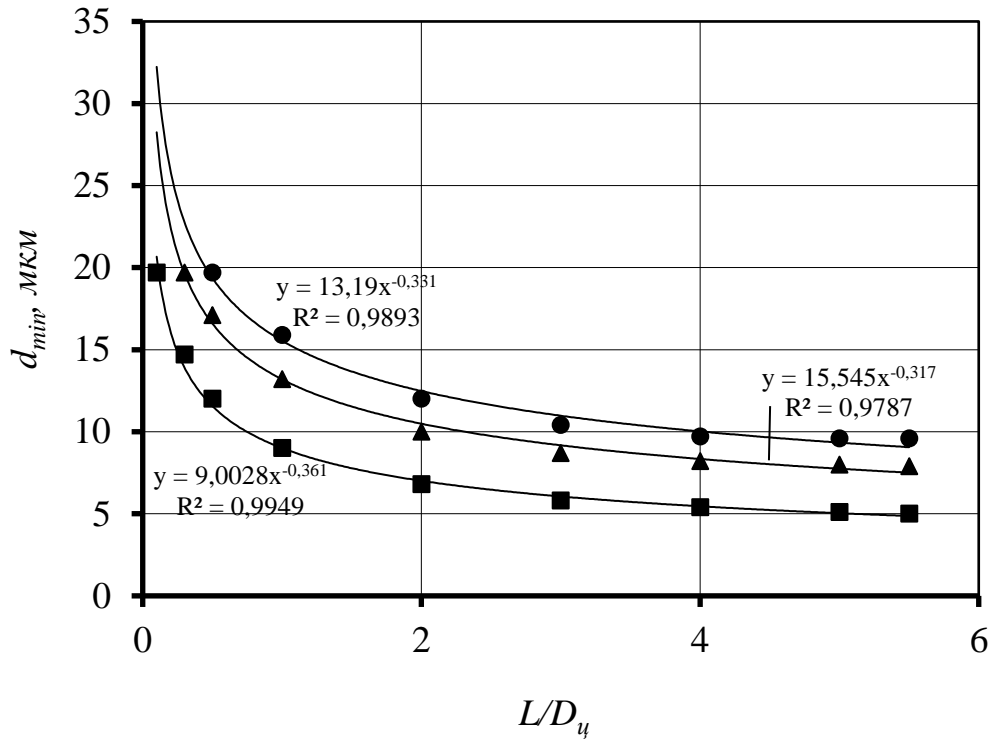
- ▲ – пил розміром 5 мкм;
- – пил розміром 10 мкм;
- + – пил розміром 15 мкм.

Циклон ЦН-24:

- ◆ – пил розміром 5 мкм;
- x – пил розміром 10 мкм;
- + – пил розміром 15 мкм.

Рисунок 1.12 – Зміна сепаруючої здатності циклону при зміні його діаметра по досвідченим даним

По (1.24) виконано розрахунки для циклонів, що працюють при перепаді тиску 800 Па на пилу різного дисперсного складу і різної щільності (рисунок 1.13). з малюнка видно, що пил розміром 20 мкм і більше досягає стінки циклонічної камери вже на її початку, більш дрібні фракції - на більшій довжині.



- — $\rho_m = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- ▲ — $\rho_m = 1150 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- — $\rho_m = 2500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Рисунок 1.13 – Значення параметрів пилу, що осаджується по довжині циклонічної камери при різній щільності пилу и перепаді тиску на циклоні рівному 800 Па

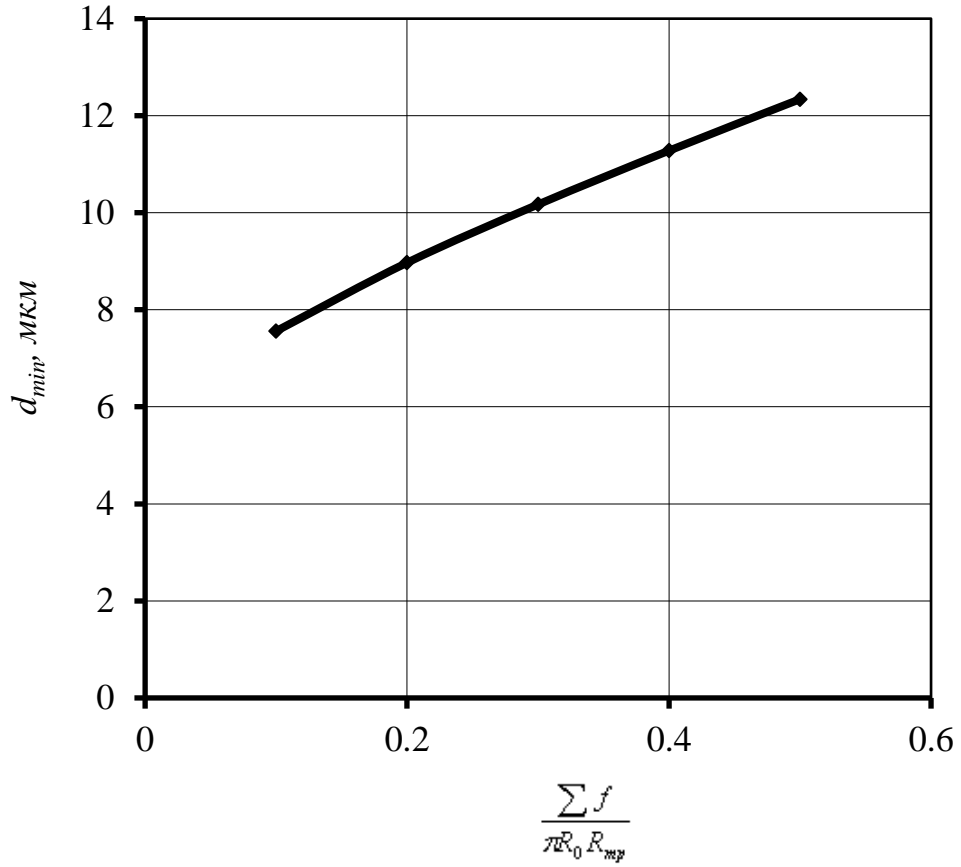


Рисунок 1.14 – Зміна діаметра частинки d_{min} по комплексу $\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp}}$ при

$\Delta P = 80$ мм вод. ст.

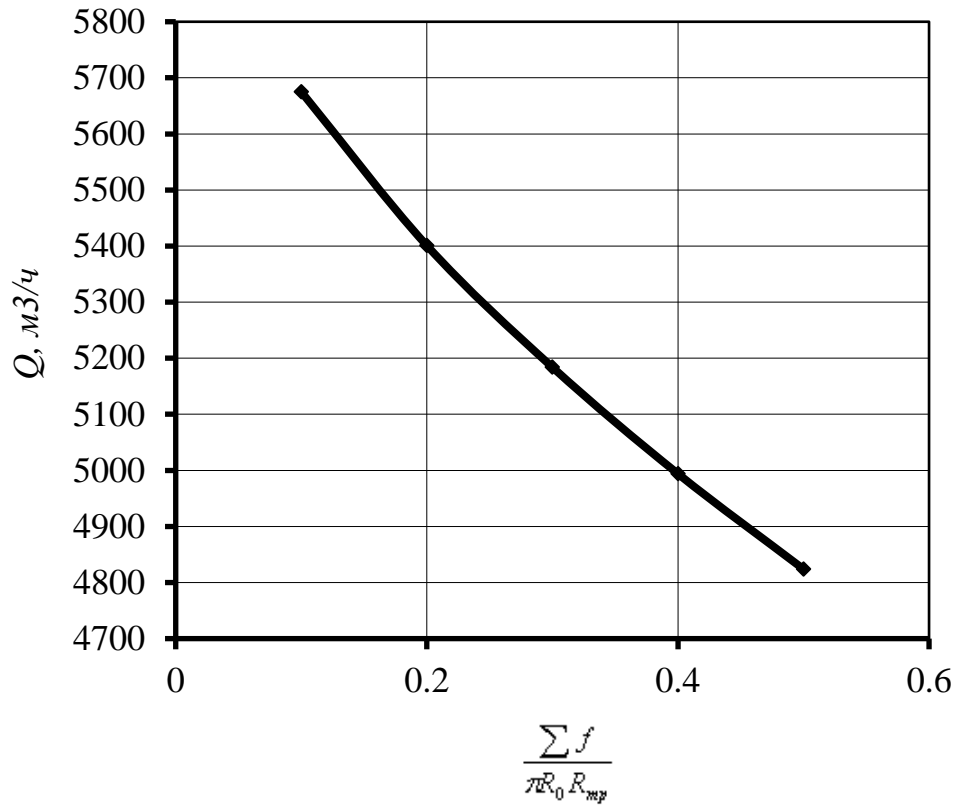


Рисунок 1.15 – Зміна витрати газу Q по комплексу $\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp}}$ при

$$\Delta P = 80 \text{ мм вод.ст.}$$

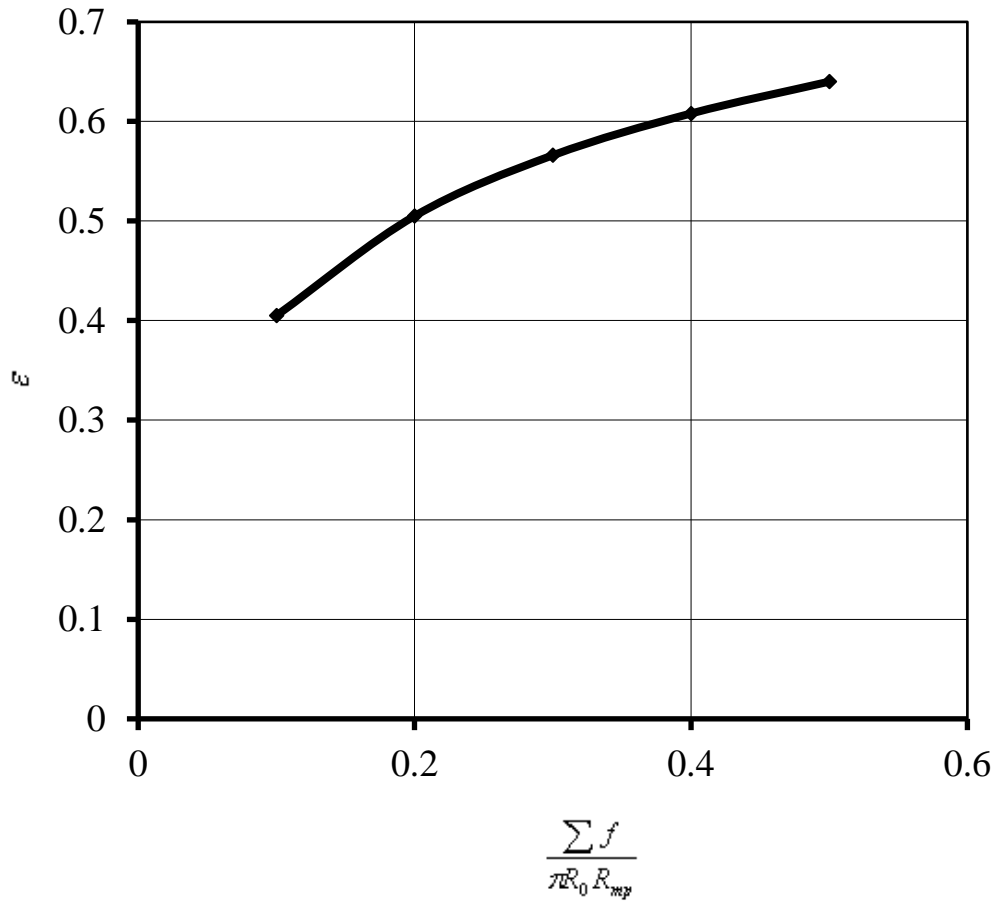
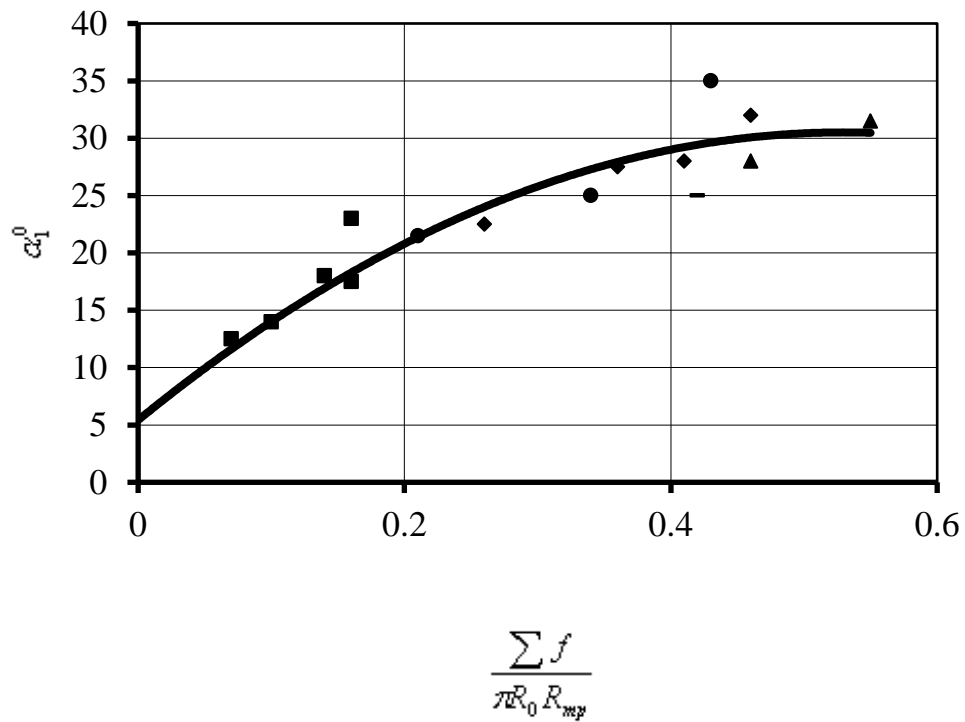


Рисунок 1.16 – Зміна коефіцієнта зменшення моменту руху по комплексу

$$\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp}} \text{ при мм вод. ст.}$$



Дослід Сігала І.Я. [17]:

▲ – улит.;

● – танг.

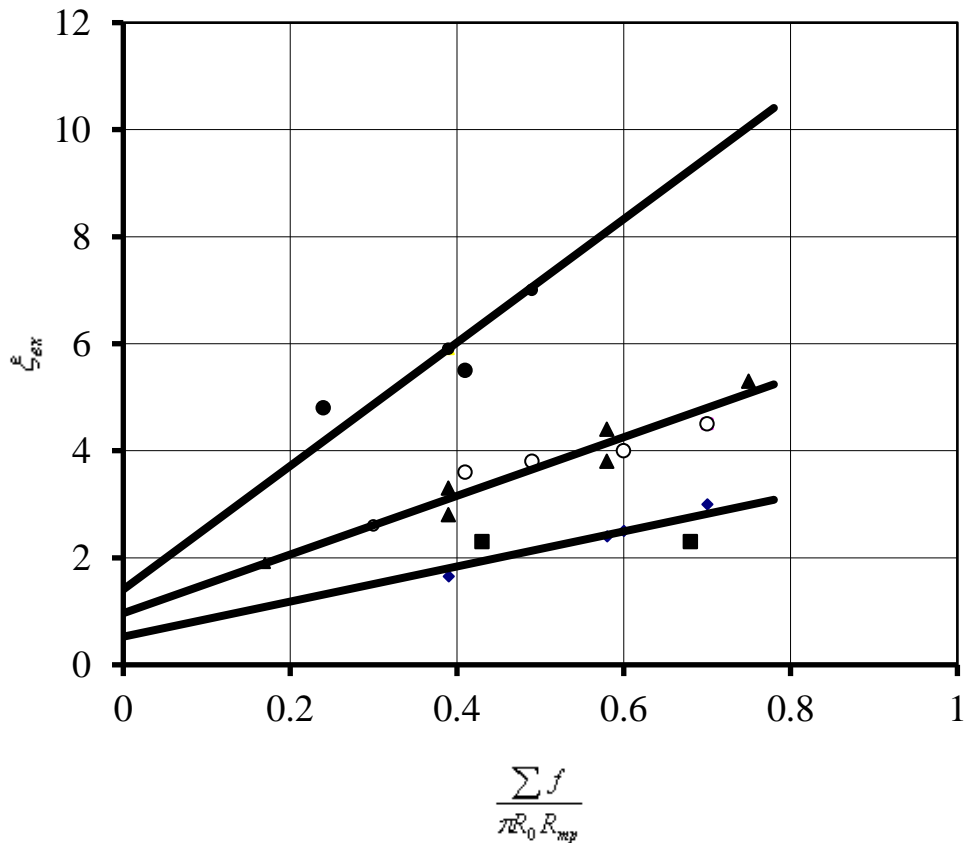
Дослід Найдьонова Г.Ф. [18]:

◆ – улит.;

- – танг.

■ – дослід Голубцова В.М. [13]

Рисунок 1.17 – Залежність кута α_1^0 кручення від комплексу $\frac{\sum f}{\pi R_0 R_{mr}}$ при $\frac{\varphi_0}{\varphi} = 1$



Досліди:

- ▲ – Гольдштика М.А. [19] } $\frac{R_0}{R_{mp}} = 0;$
 ○ – ІГІ }
 ■● – Найдъонов Г.Ф. [18]: ■ - $\frac{R_0}{R_{mp}} < 1;$
 ● - $\frac{R_0}{R_{mp}} > 1.$

Рисунок 1.18 – Залежність коефіцієнта опору $\xi_{\epsilon x}$ від комплексу $\frac{\sum f}{\pi R_0 R_{mp}}$ при

$\varphi_0 = 0,9 \div 1,0$, $\varphi = 0,7 \div 0,55$ - відповідно

2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЦИКЛОНІВ

Розрахунок циклонів зводиться до отримання їх геометричних розмірів, опору та ефективності уловлювання пилу.

В даний час найбільш поширеним методом розрахунків циклонів є метод узагальнення і використання показників, отриманих при випробуванні циклонів в промислових умовах або на стендах [25]. Так для ряду циклонів були отримані відомості про ступінь уловлювання окремих фракцій пилу - фракційний ККД - для деяких значень швидкості газу, що очищається, і щільності пилу, про коефіцієнт гідравлічного опору. Такий метод придатний для розрахунку подібних циклонів і не дозволяє розрахувати циклон, відмінний по конфігурації від випробуваних. Це значно обмежує сферу застосування даного методу.

В інших джерелах на підставі теоретичних передумов наводяться залежності, покладені в основу розрахунку циклонів [26]. Ці залежності, як правило, застосовуються одночасно з рекомендаціями, запозиченими з досвідчених узагальнень. Причому деякі рекомендації суперечливі. Так, значення коефіцієнта опору циклонів ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24 за різними джерелами мають різне значення, що ускладнює їх практичне застосування.

Метод розрахунків циклонів з використанням дослідних даних заснований на визначенні діаметра циклону за формулою

$$D_{\text{ц}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{г}}}{900 \cdot \pi \cdot W_{\text{ум}}}}, \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{г}}$ - об'ємна витрата газу через циклон, м³/год;

$W_{\text{ум}}$ - умовна видаткова швидкість газу в циклоні, м/с;

$$W_{\text{ум}} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{\text{ц}}^2} = 3 \text{ м/с} - \text{приймається.}$$

Опір циклону визначається за наступним рівнянням

$$\Delta p = \xi_0 \cdot \frac{W_{ym}^2 \cdot \rho}{2} \quad (2.2)$$

або

$$\Delta p = \xi_0 \cdot \frac{W_{ym}^2 \cdot \gamma}{2g} \quad (2.3)$$

Швидкість газу у вхідному патрубку циклона визначається

$$W_{ex} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\xi_{ex} \cdot \rho}} \quad (2.4)$$

Результати розрахунків за наведеними залежностями можуть бути не оптимальними, а ступінь уловлювання, за розробленими таблицями може не відповідати реальній, так як в розрахунках не враховується щільність сепарованих частинок, яка в кожному конкретному випадку буде своя. Тому при розрахунках циклонів краще користуватися теоретичними залежностями, які в даний момент є досить недосконалими [27].

Таким чином, жоден з розглянутих методів розрахунків не представляє теоретично обґрунтованої послідовності, що дає можливість не тільки визначити розміри циклону, а й провести аналіз за вибором його оптимальних параметрів.

2.1 Конструкція та принцип роботи циклону

Схема пиловловлювача представлена на рисунку 2.1.

Зовнішньою оболонкою пиловловлювача служить корпус 1. Діаметр і висота циліндричної частини корпусу залежать від діаметра і питомої ваги частинок пилу і розрахункової витрати повітря або газу (тобто максимальної продуктивності пиловловлювача) [28].

У нижній частині пиловловлювача встановлюється бункер для збору уловлювання пилу. Бункер складається з циліндричної і конусоподібної частин для осідання і зсипання пилу відповідно.

Співвісно корпусу всередині пиловловлювача розміщуються перфоровані циліндричні камери 3, число яких залежить від дисперсного складу пилу, який вловлюється [29]. Внутрішні камери встановлюються поступово; у верхній частині корпусу камера з великим діаметром, а в нижній - з меншим.

У верхній частині корпусу розташований патрубок підведення газу 4. Розміщений він тангенціально корпусу і сполучений з верхньою внутрішньою камерою. Перед патрубком 4 розміщена труба Вентурі 5.

По осі корпусу встановлена вихідна труба 6 для відводу очищеного газу з пиловловлювача. Нижній кінець труби 6 розміщується нижче останнього ряду отворів меншої перфорованої камери.

У нижній частині корпусу розташовані камери 7 і 8 у вигляді усічених конусів, з'єднаних між собою як показано на рисунку 2.1. Камера 7 з'єднана з нижньою перфорованою камерою і призначена для попередження попадання пилу з бункера в камеру 3. Камера 8 сприяє зниженню швидкості обертового потоку газу при вході в бункер.

По центральній осі корпусу розміщена труба, що перепускає пил, 9, поєднана з трубою Вентурі 5. Нижній кінець труби, що перепускає пил, розташований в бункері 2. На вихідній трубі встановлено равлик 10 і патрубок для відводу очищеного газу 11.

Принцип дії пиловловлювача наступний [30]. Запилене повітря (газ) через трубу Вентурі 5 надходить в патрубок підведення газу 4 і далі тангенціально в одну з перфорованих камер 3. В результаті дії відцентрових сил, відкинутий на стінки камери пил з частиною газу через отвори в стінці перфорованої камери надходить в зазор між корпусом 1 і перфорованими камерами 3, і зсипається в бункер для збору пилу 2. Рух закрученого потоку здійснюється зверху вниз. Очищений газ через вихідну трубу 6 надходить в равлика 10, після чого виводиться з пиловловлювача через вихідний патрубок 11. Пил, що осів на

стінках нижньої перфорованої камери, з деякою кількістю газу через конічну камеру 7 проходить в камеру 8, де потік газу сповільнюється і надходить в бункер 2. Газ, що потрапив в бункер для збору пилу 2 по трубі, що перепускає пил, 9 направляється в трубу Вентурі 5, де змішується з вхідним в пиловловлювач запиленним потоком і проходить повторну очистку.

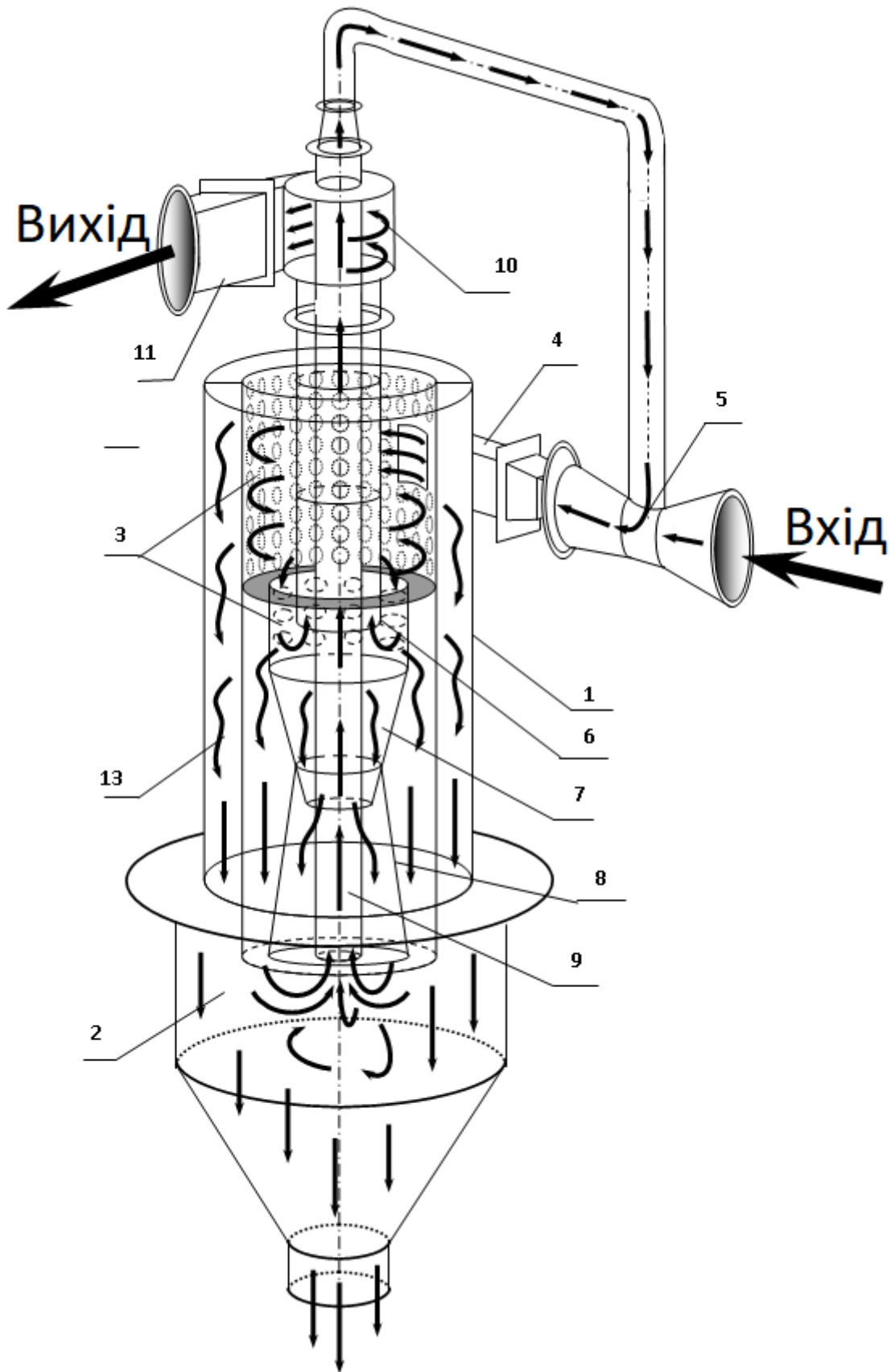


Рисунок 2.1 – Аксонометрична схема пиловловлювача.

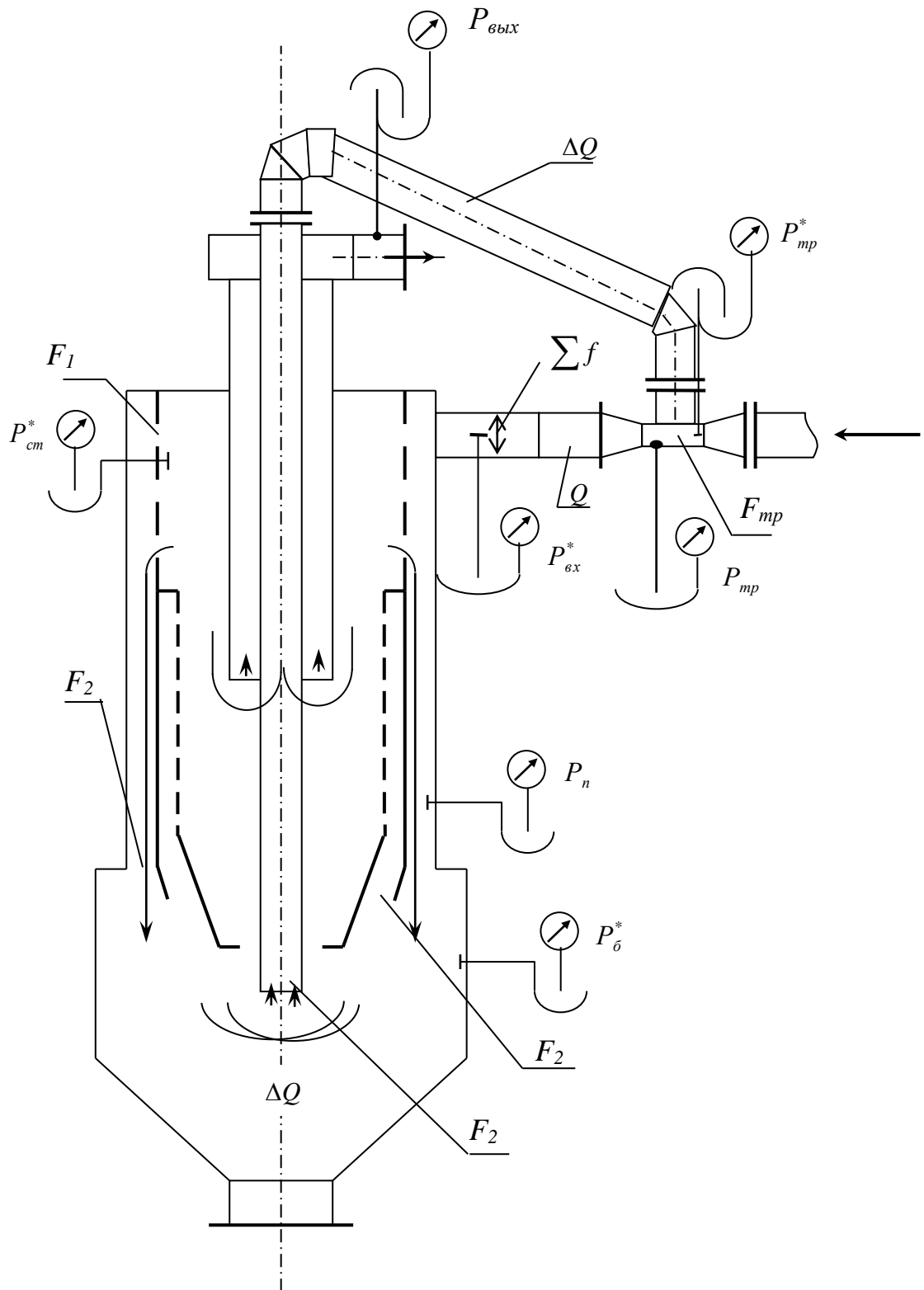


Рисунок 2.2 – Схема вертикального розтину пиловловлювача.

2.2 Розробка моделювання процесів пиловловлювання циклонів з перфорованою стінкою

Питанням пиловловлювання пилу з газів в даний час приділяється особлива увага, у зв'язку із збільшеними обсягами викидів запилених газів в атмосферу. Одним з найпростіших апаратів для уловлювання пилу від газів є циклони різних конструкцій, як НПОгаза, СІОТ, ЛІОТ і інші. Великі обсяги викидів і низькі ККД циклонів привели до суттєвої залишкової запиленості атмосфери, що зажадало як розробки нової конструкції циклонів, так і нових теоретичних рішень і систем знепилювання газів [31]. Так в роботі знайдений узагальнюючий конструктивний параметр циклонів і визначена його оптимальна величина, що забезпечує максимум ККД циклону, а в роботі отримана аналітична залежність, що характеризує довжину вихрової камери, необхідної для уловлювання мінімальних часток пилу d_{\min} .

$$L_{\max} = \frac{9D_{\text{ц}}}{\varepsilon^2} \cdot \frac{\mu}{\rho_m} \cdot \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \frac{R_{\text{ц}}}{R_0} \cdot \frac{1}{W_0} \cdot \frac{\left(\frac{R_{mp}}{R_{\text{ц}}}\right)^4 \cdot \frac{1}{\cos \beta}}{\left[1 + \frac{R_{mp}}{R_{\text{ц}}} + \left(\frac{R_{mp}}{R_{\text{ц}}}\right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_{\text{ц}}}\right)^4\right]} \cdot d_{\min}^2, \quad (2.5)$$

де $D_{\text{ц}}$ - внутрішній діаметр циклону;

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості, що очищається середовища;

ρ_m - дійсна густина порошинки;

$\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta}$ - узагальнюючий конструктивний параметр циклону;

$\sum f$ - сумарна площа патрубків підведення середовища, що очищується, в циклоні;

R_0 - плече закручування (відстань від осі патрубка підведення до осі обертання циклону);

R_{mp} - внутрішній радіус труби циклону, що відводить;

W_0 - швидкість руху, що середовища, що очищується, на виході з патрубку підведення;

β - кут нахилу патрубка підведення до горизонту;

ε - коефіцієнт зменшення моменту кількості руху від входу в циклон до виходу з газовідвідної труби.

При розробці великогабаритних циклонів їх здатність до уловлювання пилу може бути визначена на моделі менших розмірів, але для цього треба мати залежності, за якими можна було б виконати перерахунок з моделі на натуру [32].

Скориставшись залежністю (2.5) визначимо розмір пилинки, яка буде уловлена циклоном на довжині L його камери

$$d_{\min} = \frac{3D_u}{\varepsilon} \cdot \frac{\mu}{\rho_m} \cdot \frac{1}{W_0} \cdot \frac{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \frac{R_u}{R_0} \cdot \left(\frac{R_{mp}}{R_u}\right)^4}{\left[1 + \frac{R_{mp}}{R_u} + \left(\frac{R_{mp}}{R_u}\right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_u}\right)^4\right] \cdot L \cdot \cos \beta} . \quad (2.6)$$

Швидкість руху середовища, що очищується, на виході з патрубку підведення визначається

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\xi_{cx} \cdot \rho_z}} , \quad (2.7)$$

де ΔP - перепад тиску на циклоні;

ρ_z - щільність середовища, що очищується;

ξ_{cx} - коефіцієнт опору циклону, який визначається наступним чином:

$$\xi_{ex} = \left[\frac{\frac{R_0 \cdot \cos \beta}{R_y}}{\varphi_0 \cdot \frac{R_{mp}}{R_y} \left(1 - \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \cos \alpha_1} \right]^2, \quad (2.8)$$

де α_1 - кут крутки на виході з газовідвідної труби, який виражається у формі

$$\frac{4 \sin^3 \alpha_1}{(1 + \sin^2 \alpha_1) \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_1}} = \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \frac{1}{\varepsilon}. \quad (2.9)$$

Замінивши в (2.6) значення W_0 з (2.7), а ξ_{ex} з (2.8) і виконавши відповідні перетворення, отримаємо залежність, що визначає зв'язок між геометричними розмірами циклону і його здатністю вловлювати частинки пилу діаметром d_{min} в наступному вигляді

$$d = \frac{3D_y}{\varepsilon^4 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_z}}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\rho_m} \cdot \frac{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4}{\varphi_0 \left(1 - \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \cos \alpha_1 \left[1 + \frac{R_{mp}}{R_y} + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4 \right] \cdot L}}}. \quad (2.10)$$

Для геометрично подібних циклонів на підставі (2.10) можна записати

$$\frac{d}{D_y} = \frac{C}{\varepsilon} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_z}{2\Delta P}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{газ}}{\rho_m}} \cdot \sqrt{\frac{1}{L}}, \quad (2.11)$$

$$\text{де } C = \text{const} = 3 \cdot \sqrt{\frac{\frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4}{\varphi_0 \left(1 - \frac{\sum f}{\pi \cdot R_0 \cdot R_{mp} \cdot \cos \beta} \cdot \frac{1}{4 \operatorname{tg} \alpha_1} \cdot \frac{1}{\varepsilon} \right) \cdot \cos \alpha_1 \left[1 + \frac{R_{mp}}{R_y} + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^3 + \left(\frac{R_{mp}}{R_y}\right)^4 \right]}}}. \quad (2.11)$$

Із залежності (2.11) визначимо константу C

$$C = \frac{d}{D_u} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt[4]{\frac{2\Delta P}{\rho_z}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_m}{\mu_{zaz}}} \cdot \sqrt{L}. \quad (2.12)$$

Для двох подібних циклонів, з яких один позначений 1, в другий – 2, отримаємо з (2.12)

$$\frac{d_1}{D_{u1}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \sqrt[4]{\frac{2\Delta P_1}{\rho_{z1}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{m1}}{\mu_{zaz1}}} \cdot \sqrt{L_1} = \frac{d_2}{D_{u2}} \cdot \varepsilon_2 \cdot \sqrt[4]{\frac{2\Delta P_2}{\rho_{z2}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{m2}}{\mu_{zaz2}}} \cdot \sqrt{L_2}. \quad (2.13)$$

Звідки частка пилу, яка вловлюється, першого циклону визначиться розміром вловленого пилу другого циклону за наступним виразом

$$d_1 = d_2 \cdot \frac{D_{u1}}{D_{u2}} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{zaz1}}{\mu_{zaz2}}} \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}, \quad (2.14)$$

$$d_1 = d_2 \cdot \frac{D_{u1}}{D_{u2}} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_{zaz1}}{\mu_{zaz2}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{0.5},$$

ТАК ЯК $\mu = \rho \cdot \nu$, ТО

$$\left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\nu_1}{\nu_2}\right)^{0.5} = \left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{\nu_{z1}}{\nu_{z2}}\right)^{0.5},$$

ТОДІ

$$d_1 = d_2 \cdot \frac{D_{u1}}{D_{u2}} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{\rho_{z1}}{\rho_{z2}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\nu_{z1}}{\nu_{z2}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{0.5}, \quad (2.15)$$

або

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{D_{\mu 1}}{D_{\mu 2}} \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \cdot \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}\right)^{0.25} \cdot \left(\frac{P_{\varepsilon 1}}{P_{\varepsilon 2}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{T_{\varepsilon 2}}{T_{\varepsilon 1}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{v_{\varepsilon 1}}{v_{\varepsilon 2}}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{0.5} \quad (2.16)$$

Якщо під індексом 2 позначити модельний циклон, а під індексом 1 - натуральний варіант, то результати випробувань модельного циклону з уловлювання пилу діаметром d_2 можна перерахувати на уловлювання пилу натурним циклоном d_1 по залежності (2.15), як видно на рисунку 2.3 [33].

Так, якщо модель циклону виконана зменшеною в 10 разів у порівнянні з натурою, тобто, $D_{\mu 1} = 10 \cdot D_{\mu 2}$, $L_1 = 10 \cdot L_2$, а решта величин залежності (2.15) були однаковими, при цьому $d_2 = d_{2\min} = 20 \text{ мкм}$, то

$$d_{1\min} = 20 \cdot \frac{10 \cdot D_2}{D_2} \cdot \left(\frac{L_2}{10 \cdot L_2}\right)^{0.5} = 20 \cdot \frac{10}{3.16} = 63 \text{ мкм}$$

Тобто збільшується в 3 рази, що приведе до зниження КПД.

Отже, якщо фракційний склад пилу розміром $d < d_{\min}$ (20 мкм) склав 10 %, а при $d < 63 \text{ мкм}$ склав 20 %, то при $\eta_{20} = 90$ %, при $\eta_{63} = 80$ %. Про те, що зі збільшенням діаметра циклону ККД його зменшується відомо, про що свідчать досвідчені дані, представлені на рисунку 2.3 [34].

Щільність газу $\rho_{\varepsilon} = \frac{P_{\varepsilon}}{R \cdot T_{\varepsilon}}$, тоді

$$\left(\frac{\rho_{\varepsilon 1}}{\rho_{\varepsilon 2}}\right)^{0.75} = \left(\frac{P_{\varepsilon 1}}{R_1 \cdot T_{\varepsilon 1}} \cdot \frac{R_2 \cdot T_{\varepsilon 2}}{P_{\varepsilon 2}}\right)^{0.75} = \left(\frac{P_{\varepsilon 1}}{P_{\varepsilon 2}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{T_{\varepsilon 2}}{T_{\varepsilon 1}}\right)^{0.75} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{0.75},$$

$$\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{0.75} = \left(\frac{8314 \cdot \mu_1}{\mu_2 \cdot 8314}\right)^{0.75} = \left(\frac{\mu_1}{\mu_2}\right)^{0.75}, \quad \text{де} \quad \mu = \frac{\kappa^2}{\text{кмоль}} - \text{молекулярна маса}$$

очищеного середовища.

$$\varepsilon = \frac{M_{\text{вих}}}{M_{\text{вх}}} = \frac{C_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot R_{mp}}{W_0 \cdot R_0} = \frac{C_{\text{умн}} \cdot R_{mp}}{W_0 \cdot R_0} = C_1 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \frac{R_{mp}}{R_0} \cdot \sqrt{\frac{\xi_{\text{вх}} \cdot \rho_z}{2\Delta P}} = \frac{Q}{F_{mp}} \cdot \frac{\cos \alpha_1}{\sin \alpha_1} \cdot \frac{R_{mp}}{R_0} \cdot \frac{\sum f}{Q} = \frac{\sum f}{F_{mp}} \cdot \frac{R_{mp}}{R_0} \cdot \text{ctg} \alpha_1$$

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\sum f_2}{\sum f_1} \cdot \frac{F_{mp1}}{F_{mp2}} \cdot \frac{R_{mp2}}{R_{mp1}} \cdot \frac{R_{01}}{R_{02}} \cdot \frac{\text{tg} \alpha_2}{\text{tg} \alpha_1} = \frac{\sum f_2}{10 \sum f_1} \cdot \frac{10 F_{mp2}}{F_{mp2}} \cdot \frac{10 R_{02}}{R_{02}} = 10;$$

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)_2 \cdot \left(\frac{R_{mp}}{R_0}\right)_2 \cdot (\text{ctg} \alpha_1)_2}{\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)_1 \cdot \left(\frac{R_{mp}}{R_0}\right)_1 \cdot (\text{ctg} \alpha_1)_1} = 1, \quad \text{так як геометрично подібні.}$$

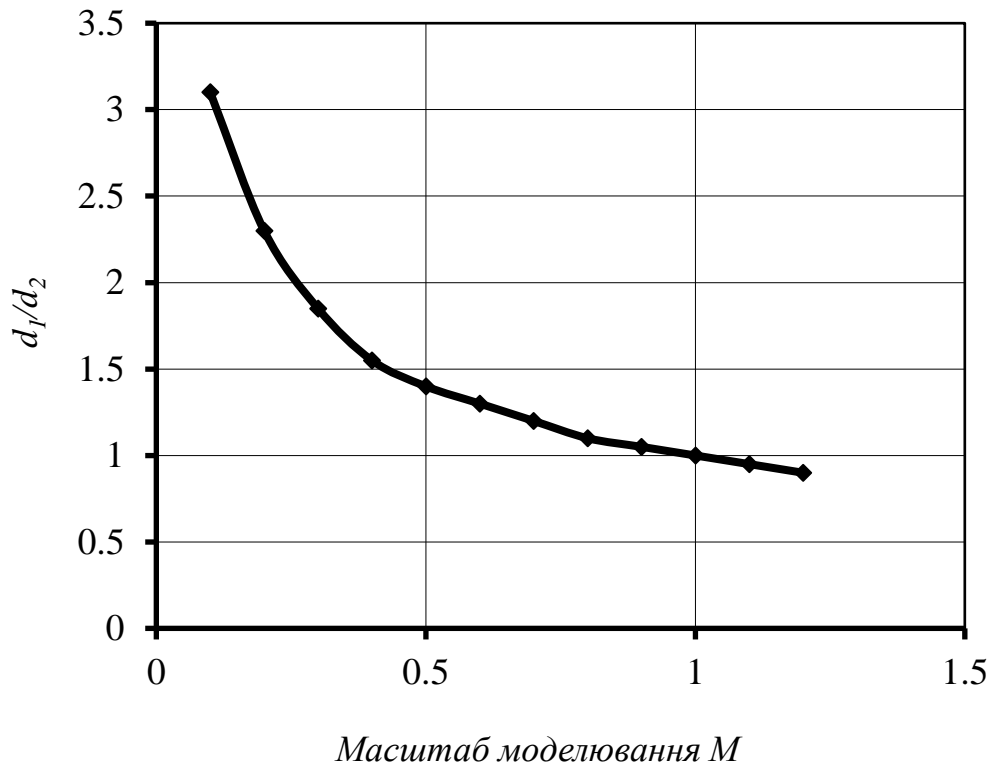


Рисунок 2.3 - Зміна діаметру пилу, що уловлюється, натуральним циклоном від зміни масштабу модельного циклону

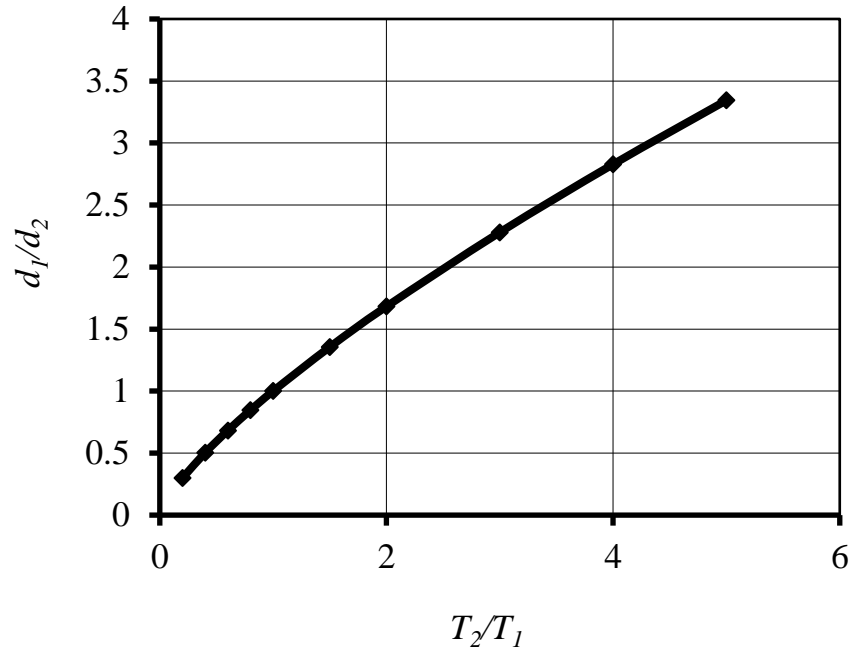


Рисунок 2.4 - Вплив зміни температур на діаметр вловленого пилю

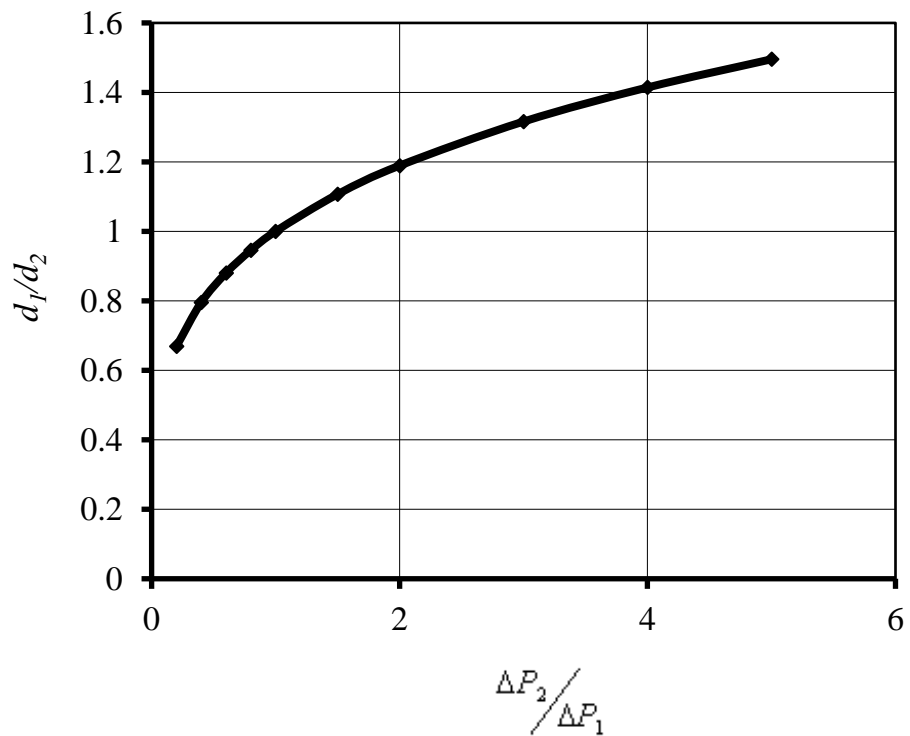


Рисунок 2.5 - Вплив зміни перепаду тисків на діаметр вловленого пилю.

2.3 Висновок аналітичних залежностей для розрахунку площі вузького перетину труби Вентурі

Для того щоб рух газу по трубі, що перепускає пил, (перетікання) відбувся з бункера на вхід в пиловловлювач, а не навпаки, необхідно розрахувати площу мінімального перерізу труби Вентурі так, щоб тиск в цьому перерізі був би менше, ніж тиск в бункері [35]. Рух потоків газу, значення площ перетинів і тисків показано на рисунку 2.4. Як показали досліди, саме високий тиск спостерігається у верхній перфорованій камері пиловловлювача. Тому витоки з бункера на вхід в пиловловлювач визначаються витоками з верхньої камери.

Відповідно до рівняння Бернуллі витоки визначаються за такою залежністю

$$\Delta Q = F_{\text{экв}} \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{\text{ст}}^* - P_{\text{тр}})}{\rho}}. \quad (2.17)$$

Повний тиск у внутрішній стінці верхньої камери пиловловлювача визначимо за наступним виразом

$$P_{\text{ст}}^* = P_{\text{вх}}^* - \Delta P_{\text{ном.ст}}^*, \quad (2.18)$$

де $\Delta P_{\text{ном.ст}}^*$ - втрати повного тиску від входу в пиловловлювач до стінки верхньої камери.

Статичний тиск у вузькому перерізі труби Вентурі відповідно до рівняння Бернуллі визначиться за такою залежністю

$$P_{\text{тр}} = P_{\text{тр}}^* - \frac{\rho \cdot W_{\text{тр}}^2}{2}, \quad (2.19)$$

де $W_{\text{тр}}$ - швидкість руху потоку у вузькому перерізі труби Вентурі і, відповідно до рівняння нерозривності (при $\rho = \text{const}$) визначиться

$$W_{mp} = \frac{Q}{F_{mp}}, \quad (2.20)$$

де Q - витрата газу через перетин труби Вентурі з площею вузького перетину $F_{тр}$, рівний витраті газу через пиловловлювач, який визначиться за такою залежністю

$$Q = W_0 \sum f, \quad (2.21)$$

де W_0 - швидкість газу у вхідному патрубку пиловловлювача з площею мінімального перетину $\sum f$.

Швидкість газу у вхідному патрубку пиловловлювача визначиться за такою залежністю

$$W_0 = \sqrt{\frac{2(P_{ex}^* - P_{вых})}{\xi_{ex}\rho}} = \sqrt{\frac{2P_u}{\xi_{ex}\rho}}, \quad (2.22)$$

де ξ_{ex} - коефіцієнт опору пиловловлювача, величина якого визначена, як $\Delta P_u = P_{ex}^* - P_{вых}$ - різниця між повним тиском на вході в пиловловлювач і статичним тиском на виході з пиловловлювача.

З урахуванням (2.19) залежність (2.20) можна записати

$$P_{mp} = P_{mp}^* - \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{Q}{F_{mp}} \right)^2. \quad (2.23)$$

Підставляючи (2.21) отримаємо

$$P_{mp} = P_{mp}^* - \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{W_0 \cdot \sum f}{F_{mp}} \right)^2 = P_{mp}^* - \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\sum f}{F_{mp}} \right)^2 \cdot W_0^2. \quad (2.24)$$

Підставивши значення швидкості газу W_0 , отримаємо такий вираз

$$P_{mp} = P_{mp}^* - \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{\sum f}{F_{mp}} \right)^2 \cdot \frac{2 \cdot \Delta P_{\psi}}{\xi_{ex} \cdot \rho} \quad (2.25)$$

або

$$P_{mp} = P_{mp}^* - \left(\frac{\sum f}{F_{mp}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{ex}} \cdot \Delta P_{\psi} \quad (2.26)$$

Різницю тисків рівняння (2.17) визначимо відніманням (2.26) з (2.18)

$$P_{cm}^* - P_{mp} = P_{ex}^* - P_{mp}^* + \left(\frac{\sum f}{F_{mp}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{ex}} \cdot \Delta P_{\psi} - \Delta P_{nom.cm}^* \quad (2.27)$$

Еквівалентну площу визначимо, виходячи з постійності витрати витоків з верхньої камери через площі F_1 , F_2 , і F_3

$$\Delta Q = F_1 \cdot \sqrt{\frac{2(P_{cm}^* - P_n)}{\rho}} = F_2 \cdot \sqrt{\frac{2(P_n^* - P_{\sigma})}{\rho}} = F_3 \cdot \sqrt{\frac{2(P_{\sigma}^* - P_{mp})}{\rho}} \quad (2.28)$$

Вирішуємо щодо:

- різниці між статичним тиском у стінки верхньої камери і повним тиском у внутрішній пазусі пиловловлювача

$$P_{cm}^* - P_n = \left(\frac{\Delta Q}{F_1} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2}; \quad (2.29)$$

- різниці між статичним тиском у внутрішній пазусі пиловловлювача і повним тиском в бункері

$$P_n^* - P_{\delta} = \left(\frac{\Delta Q}{F_2} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2}; \quad (2.30)$$

- різниці між статичним тиском в бункері і повним тиском у вузькому перерізі труби Вентурі

$$P_{\delta}^* - P_{mp} = \left(\frac{\Delta Q}{F_3} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2}. \quad (2.31)$$

Складаючи (2.29), (2.30) і (2.31), отримаємо

$$P_{cm}^* - P_n + P_n^* - P_{\delta} + P_{\delta}^* - P_{mp} = \frac{\rho}{2} \cdot \left[\left(\frac{\Delta Q}{F_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta Q}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta Q}{F_3} \right)^2 \right]. \quad (2.32)$$

За умови рівності статичного P^* і повного тиску для бункера і внутрішньої пазухи пиловловлювача (що допустимо), можна записати

$$P_{cm}^* - P_{mp} = \Delta Q^2 \cdot \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{1}{F_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{1}{F_3} \right)^2 \right], \quad (2.33)$$

звідки

$$\Delta Q = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{1}{F_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{1}{F_3} \right)^2 \right]}} \cdot \sqrt{\frac{2(P_{cm}^* - P_{mp})}{\rho}}. \quad (2.34)$$

Порівнюючи (2.17) і (2.34) отримаємо

$$F_{\text{екв}} = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{1}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{F_3}\right)^2\right]}}. \quad (2.35)$$

Площа вузького перетину труби Вентурі визначимо з рівняння (2.17) при заміні в ньому $P_{\text{ст}}^* - P_{\text{тр}}$ за рівнянням (2.33) і $F_{\text{екв}}$ за рівнянням (2.35)

$$\Delta Q = F_{\text{екв}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \left[P_{\text{вх}}^* - P_{\text{тр}}^* + \left(\frac{\sum f}{F_{\text{тр}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{\text{вх}}} \cdot \Delta P_{\text{ц}} - P_{\text{ном.ст}}^* \right]}. \quad (2.36)$$

Вирішуємо рівняння щодо $\left(\frac{\sum f}{F_{\text{тр}}} \right)^2$

$$\left(\frac{\Delta Q}{F_{\text{екв}}} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} = P_{\text{вх}}^* - P_{\text{тр}}^* + \left(\frac{\sum f}{F_{\text{тр}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{\text{вх}}} \cdot \Delta P_{\text{ц}} - \Delta P_{\text{ном.ст}}^*. \quad (2.37)$$

Виділимо елемент $\left(\frac{\sum f}{F_{\text{тр}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{\text{вх}}} \cdot \Delta P_{\text{ц}}$

$$\left(\frac{\sum f}{F_{\text{тр}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{\text{вх}}} \cdot \Delta P_{\text{ц}} = -(P_{\text{вх}}^* - P_{\text{тр}}^*) + \left(\frac{\Delta Q}{F_{\text{екв}}} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} + \Delta P_{\text{ном.ст}}^*. \quad (2.38)$$

Тоді квадрат відношення площі патрубка підведення газу і мінімального прохідного перетину труби Вентурі можна записати

$$\left(\frac{\sum f}{F_{\text{тр}}} \right)^2 = (P_{\text{вх}}^* - P_{\text{тр}}^*) \cdot \frac{\xi_{\text{вх}}}{\Delta P_{\text{ц}}} + \left(\frac{\Delta Q}{F_{\text{екв}}} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\xi_{\text{вх}}}{\Delta P_{\text{ц}}} + \Delta P_{\text{ном.ст}}^* \cdot \frac{\xi_{\text{вх}}}{\Delta P_{\text{ц}}} \quad (2.39)$$

або

$$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 = \left(\frac{\Delta Q}{F_{экс}}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\xi_{ex}}{\Delta P_{\psi}} - \xi_{ex} \cdot \frac{P_{ex}^* - P_{mp}^*}{\Delta P_{\psi}} + \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}. \quad (2.40)$$

Так як

$$\Delta Q^2 = k^2 Q^2 = k^2 (\sum f)^2 \cdot \frac{2\Delta P_{\psi}}{\xi_{ex} \cdot \rho} = \left(\frac{\sum f}{F_{экс}}\right)^2 \cdot k^2,$$

де

$$k = \frac{\Delta Q}{Q},$$

то

$$\left(\frac{\Delta Q}{F_{экс}}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\xi_{ex}}{\Delta P_{\psi}} = \left(\frac{1}{F_{экс}}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{\xi_{ex}}{\Delta P_{\psi}} \cdot k^2 (\sum f)^2 \cdot \frac{2\Delta P_{\psi}}{\xi_{ex} \cdot \rho} = \left(\frac{\sum f}{F_{экс}}\right)^2 \cdot k^2. \quad (2.41)$$

Отже,

$$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 = \left(\frac{\sum f}{F_{экс}}\right)^2 \cdot k^2 - \xi_{ex} \cdot \frac{P_{ex}^* - P_{mp}^*}{\Delta P_{\psi}} + \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}, \quad (2.42)$$

з урахуванням (2.35)

$$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 = \left(\sum f \sqrt{\left(\frac{1}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{F_3}\right)^2}\right)^2 \cdot k^2 - \xi_{ex} \cdot \frac{P_{ex}^* - P_{mp}^*}{\Delta P_{\psi}} + \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}} \quad (2.43)$$

або

$$\frac{\sum f}{F_{mp}} = \sqrt{k^2 \cdot \left[\left(\frac{\sum f}{F_1} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3} \right)^2 \right] - \xi_{ex} \cdot \frac{P_{ex}^* - P_{mp}^*}{\Delta P_{\psi}} + \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}} \cdot \xi_{ex}} \quad (2.44)$$

Прийнявши $P_{ex}^* = P_{mp}^*$, що допустимо, отримаємо

$$\frac{\sum f}{F_{mp}} = \sqrt{k^2 \cdot \left[\left(\frac{\sum f}{F_1} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3} \right)^2 \right] + \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}} \quad (2.45)$$

або

$$\frac{F_{mp}}{\sum f} = \left\{ k^2 \cdot \left[\left(\frac{\sum f}{F_1} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3} \right)^2 \right] + \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}} \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.46)$$

З (2.46) випливає, що відносна площа мінімального перерізу труби Вентурі визначається величиною витоків k , відносними розмірами отворів, що перепускають пил, $\left(\frac{\sum f}{F_i} \right)$, коефіцієнтом опору пиловловлювача (ξ_{ex}) і втратами повного тиску від входу в пиловловлювач до верхньої вихрової камери ($\Delta P_{nom.cm}^*$) [36].

У рівнянні (2.46) коефіцієнт витоків k задається з умови максимуму ККД пиловловлювача, який повинен бути визначений з досвідчених даних.

Для модельного пиловловлювача, що пройшов випробування на ДЕЗє, відносні площі мають таке значення

$$\frac{\sum f}{F_{mp}} = 1,7945 ;$$

$$\frac{\sum f}{F_1} = 0,5;$$

$$\frac{\sum f}{F_2} = 1,631;$$

$$\frac{\sum f}{F_3} = 0,77.$$

Для цих значень відносних площ побудуємо залежність витоків з бункера в трубу Вентурі при зміні втрат тиску в пиловловлювачі, тобто

$$\frac{\Delta Q}{Q} = f \left(\xi_{ex} \frac{\Delta P_{nom}^*}{\Delta P_y} \right).$$

Визначимо цю залежність з (2.46)

$$\frac{\sum f}{F_{mp}} = \sqrt{k^2 \cdot \left[\left(\frac{\sum f}{F_1} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3} \right)^2 \right] + \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_y}}.$$

Звівши обидві частини рівняння в квадрат, отримаємо

$$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}} \right)^2 = k^2 \cdot \left[\left(\frac{\sum f}{F_1} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2} \right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3} \right)^2 \right] + \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_y}, \quad (2.47)$$

звідки

$$k^2 = \frac{\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 - \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}}{\left(\frac{\sum f}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3}\right)^2}. \quad (2.48)$$

Таким чином, витоки з бункера в трубу Вентурі можна визначити як

$$\frac{\Delta Q}{Q} = k = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 - \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}}{\left(\frac{\sum f}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3}\right)^2}}. \quad (2.49)$$

Критичне значення втрат тиску, тобто втрати тиску в пиловловлювачі, при яких витоку відбуватися не будуть, можна визначити з (2.45), прийнявши $k=0$

$$\frac{\sum f}{F_{mp}} = \sqrt{0 \cdot \left[\left(\frac{\sum f}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3}\right)^2 \right] + \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}}, \quad (2.50)$$

тобто

$$\xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}} = \left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2. \quad (2.51)$$

Для зазначеного вище значення відносної площі модельного пиловловлювача

$$\frac{\sum f}{F_{mp}} = 1,7945, \text{ критичний перепад тисків визначиться}$$

$$\xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}} = 1,7945^2,$$

$$\xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}} = 3,22.$$

Підставляючи в (2.49) значення відносних площ модельного пиловловлювача, отримаємо формулу для побудови залежності

$$\frac{\Delta Q}{Q} = f\left(\xi_{ex} \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}\right),$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = k = \sqrt{\frac{1,7945^2 - \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}}{0,5^2 + 1,631^2 + 0,77^2}},$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \sqrt{\frac{3,22 - \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}}{3,503}}. \quad (2.52)$$

Розрахунок по (2.52) для різних значень $\xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}$ наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Зміна витоків з бункера в трубу Вентурі при зміні втрат тиску в пиловловлювачі.

$\xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}$	1,5	2,0	2,5	3,0	3,1	3,2	3,3	3,5	4,0
$\frac{\Delta Q}{Q}$	0,701	0,590	0,453	0,251	0,185	0,076	-0,151	-0,283	-0,472

За даними таблиці 2.1 на рисунку 2.6 побудований графік залежності $\frac{\Delta Q}{Q}$ від

$$\xi_{\text{вх}} \cdot \frac{\Delta P_{\text{ном.ст}}^*}{\Delta P_{\text{ц}}}.$$

З графіка видно, що для забезпечення позитивних витоків з бункера в трубу Вентурі необхідно, щоб відносний перепад тисків на пиловловлювачі був менше величини 3,22 [7]. Для пиловловлювача з відмінними від модельного пиловловлювача геометричними параметрами критична величина відносного тиску буде визначатися за формулою (2.51), тобто

$$\left(\xi_{\text{вх}} \cdot \frac{\Delta P_{\text{ном.ст}}^*}{\Delta P_{\text{ц}}} \right)_{\text{крит}} = \left(\frac{\sum f}{F_{\text{тр}}} \right)^2. \quad (2.53)$$

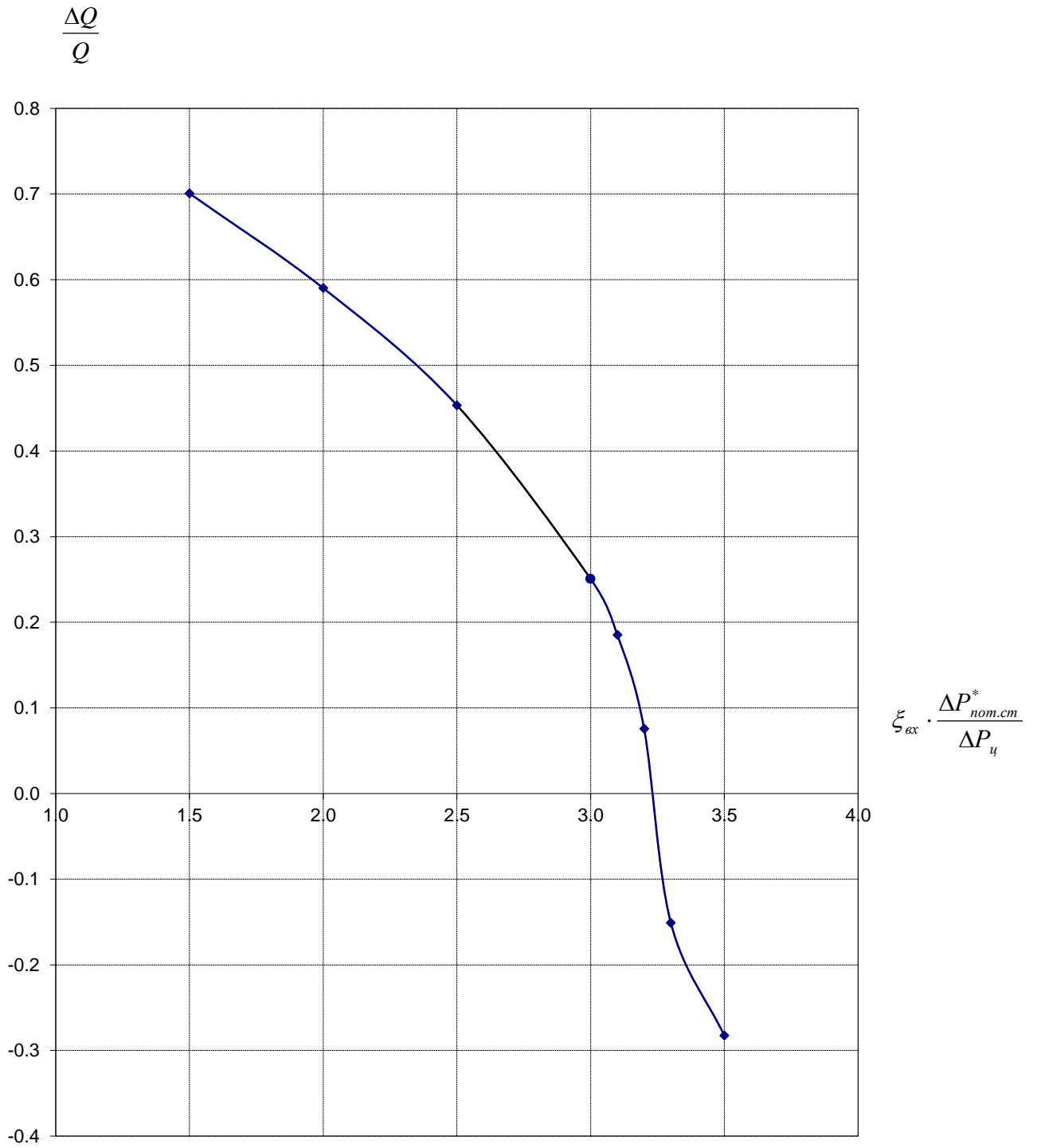


Рисунок 2.6 - Зміна витоків з бункера в трубу Вентурі при зміні втрат тиску в пиловловлювачі.

2.4 Висновок аналітичних залежностей по розрахунку перепаду тиску між бункером пиловловлювача і вузьким перетином труби Вентурі

При організації витоків з бункера на вхід в пиловловлювач з використанням труби Вентурі необхідно мати позитивний перепад тисків між бункером і трубою Вентурі. Тому необхідно знати умови, при яких ці вимоги будуть виконуватися [38]. Відповідь на це питання можна отримати, маючи аналітичну залежність, що зв'язує перепад тисків між бункером і вузьким перетином труби Вентурі і конструктивними і режимними параметрами системи пиловловлювач - труба Вентурі.

Виходячи з адекватності витоків через площі отворів пиловловлювача F_1 , F_2 , F_3 , використавши (2.36), запишемо

$$\Delta Q = F_{\text{экв}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \left[P_{\text{вх}}^* - P_{\text{мп}}^* + \left(\frac{\sum f}{F_{\text{мп}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{\text{вх}}} \cdot \Delta P_{\text{ц}} - \Delta P_{\text{ном.см}}^* \right]} = F_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{\text{б}}^* - P_{\text{мп}})}, \quad (2.54)$$

звідси

$$F_{\text{экв}}^2 \cdot \frac{2}{\rho} \cdot \left[P_{\text{вх}}^* - P_{\text{мп}}^* + \left(\frac{\sum f}{F_{\text{мп}}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{\text{вх}}} \cdot \Delta P_{\text{ц}} - \Delta P_{\text{ном.см}}^* \right] = F_3^2 \cdot \frac{2}{\rho} \cdot (P_{\text{б}}^* - P_{\text{мп}}), \quad (2.55)$$

тоді різниця тисків між бункером та трубою Вентурі можна запасати

$$P_{\text{б}}^* - P_{\text{мп}} = \left(\frac{F_{\text{экв}}}{F_3} \right)^2 \left[P_{\text{вх}}^* - P_{\text{мп}}^* + \left(\frac{\sum f}{F_{\text{мп}}} \right)^2 \cdot \frac{\Delta P_{\text{ц}}}{\xi_{\text{вх}}} - \Delta P_{\text{ном.см}}^* \right], \quad (2.56)$$

де, у відношенні з (2.51)

$$\left(\frac{F_{\text{эКБ}}}{F_3}\right)^2 = \frac{1}{F_3^2 \left[\left(\frac{1}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{1}{F_3}\right)^2 \right]} = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_3}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{F_3}{F_2}\right)^2}. \quad (2.57)$$

Розділивши ліву і праву частини рівняння (2.56) на різницю тисків ΔP_u з урахуванням значення $\frac{F_{\text{эКБ}}}{F_3}$, отримаємо

$$\frac{P_{\delta}^* - P_{mp}}{\Delta P_u} = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_3}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{F_3}{F_2}\right)^2} \cdot \left[\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{\text{вх}}} + \frac{P_{\text{вх}}^* - P_{mp}^*}{\Delta P_u} - \frac{\Delta P_{\text{ном.см}}^*}{\Delta P_u} \right]. \quad (2.58)$$

Нехтуючи втратою повного тиску на ділянці від «горла» труби Вентурі до вхідного патрубка в пиловловлювач (тобто $P_{\text{вх}}^* - P_{mp}^* = 0$), отримаємо залежність для розрахунку перепаду тиску між бункером і трубою Вентурі

$$\frac{P_{\delta}^* - P_{mp}}{\Delta P_u} = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_3}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{F_3}{F_2}\right)^2} \cdot \left[\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{\text{вх}}} - \frac{\Delta P_{\text{ном.см}}^*}{\Delta P_u} \right] \quad (2.59)$$

Із залежності (2.59) видно, що різниця тисків між бункером і трубою Вентурі визначається:

- розмірами прохідних перетинів для організації витоків з пиловловлюючої камери (F_1, F_2, F_3);
- співвідношення площ «горла» труби Вентурі і вхідного патрубка в пиловловлювач;
- коефіцієнтом опору пиловловлювача $\xi_{\text{вх}}$;
- втратами повного тиску потоку від перетину на вході в пиловловлювач до стінки перфорованої поверхні $\Delta P_{\text{ном.см}}^*$;

- перепадом тиску на пиловловлювачі [39].

З (2.59) також випливає, що, якщо значення відношення $\frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\zeta}}$ для одного і того ж пиловловлювача залишиться постійним, то слід очікувати, що відношення $\frac{P_{\delta}^* - P_{mp}}{\Delta P_{\zeta}}$ має бути постійним. Рівняння (2.58) є джерелом для визначення критичного значення відношення $\frac{\sum f}{F_{mp}}$, при якому різниця тисків між бункером і трубою Вентурі буде нульовою. Дійсно, при $\frac{P_{\delta}^* - P_{mp}}{\Delta P_{\zeta}} = 0$ матимемо

$$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\xi_{ex}} - \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\zeta}} = 0, \quad (2.60)$$

звідси

$$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}} \right) = \sqrt{\xi_{ex} \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\zeta}}}. \quad (2.61)$$

Для забезпечення перетоків з бункера на вхід в пиловловлювач необхідно витримати таке співвідношення

$$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}} \right) > \sqrt{\xi_{ex} \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\zeta}}} \quad (2.62)$$

Правомочність цих міркувань може бути підтверджена відповідними експериментами.

2.5 Висновок аналітичної залежності для розрахунку перетоків з бункера на вихід в пиловловлювач через трубу Вентурі

Площа мінімального перетину труби Вентурі, що забезпечує задані перетікання на вхід в пиловловлювач, визначена залежністю (2.58), де $k = \frac{\Delta Q}{Q}$.

Рішення рівняння (2.46) щодо k призводить до вираження, що визначає витоки з бункера на вхід в пиловловлювач [40].

Відповідно до рівняння (2.46)

$$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 = k^2 \left[\left(\frac{\sum f}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3}\right)^2 \right] + \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}, \quad (2.63)$$

звідки знайдемо коефіцієнт k

$$k = \frac{\Delta Q}{Q} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 - \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}}{\left(\frac{\sum f}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\sum f}{F_3}\right)^2}} \quad (2.64)$$

або

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 - \xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}}{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\sum f}{F_i}\right)^2}} \quad (2.65)$$

Побудуємо графік залежності витоків з бункера пиловловлювача на вхід в трубу Вентурі при зміні площі вузького перетину труби Вентурі. Підставляючи в

(2.64) геометричні параметри і критичне значення відносного перепаду тисків

$\xi_{ex} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\zeta}} = 3,22$ модельного пиловловлювача, отримаємо

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 - 3,22}{0,5^2 + 1,631^2 + 0,77^2}}, \quad (2.66)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 - 3,22}{3,503}}, \quad (2.67)$$

або

$$\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 = \frac{1}{3,503} \cdot \left[\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2 - 3,22\right] \quad (2.68)$$

Графік залежності $\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2$ від $\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2$ представлений на рисунку 2.7.

Графік побудований за розрахунком, представленою в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Залежність перетоків з бункера в трубу Вентурі при зміні відносної площі вузького перетину труби Вентурі.

$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2$	-0,63	-0,35	-0,06	0,223	0,508	0,794	1,079	1,365	1,65	1,935

Побудуємо залежність $\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)$ від $\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)$ за наступними даними.

Таблиця 2.3 - Залежність перетоків з бункера в трубу Вентурі при зміні відносної площі вузького перетину труби Вентурі.

$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)$	1,00	1,41	1,73	2,00	2,24	2,45	2,65	2,83	3,00	3,16
$\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)$	-0,80	-0,59	-0,25	0,47	0,71	0,89	1,04	1,17	1,28	1,39

За цими даними побудовано графік (рисунок 2.8).

З рівняння (2.57) видно, що величина ΔQ може бути як позитивною, так і негативною. При $\xi_{вх} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{ц}} > \left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right)^2$ величина ΔQ негативна. Це свідчить про перетікання в бункер, як слідство, до додаткового уносу пилу з бункера, і як, наслідок, до зниження ККД пиловловлювача. Тому, щоб уникнути негативних перетоків слід виконувати умову

$$\frac{\sum f}{F_{mp}} > \sqrt{\xi_{вх} \cdot \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{ц}}}$$

Таким чином, для розрахунку розмірів площі вузького перетину труби Вентурі необхідно вміти розраховувати коефіцієнт опору пиловловлювача і втрати повного тиску від входу в пиловловлювач до перфорованих отворів вихривий камери пиловловлювача [41].

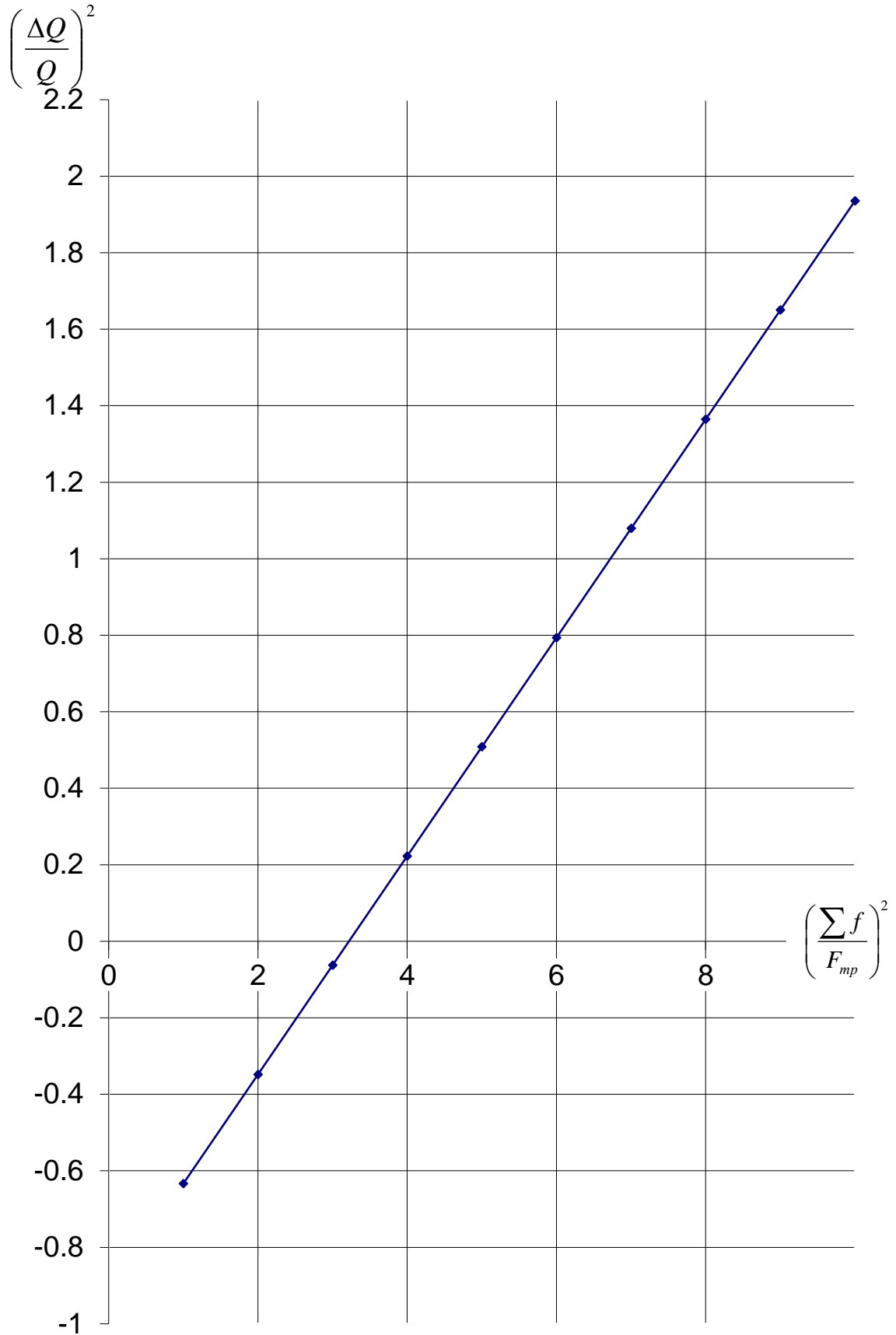


Рисунок 2.7 - Залежність перетоків з бункера в трубу Вентурі при зміні відносної площі вузького перетину труби Вентурі

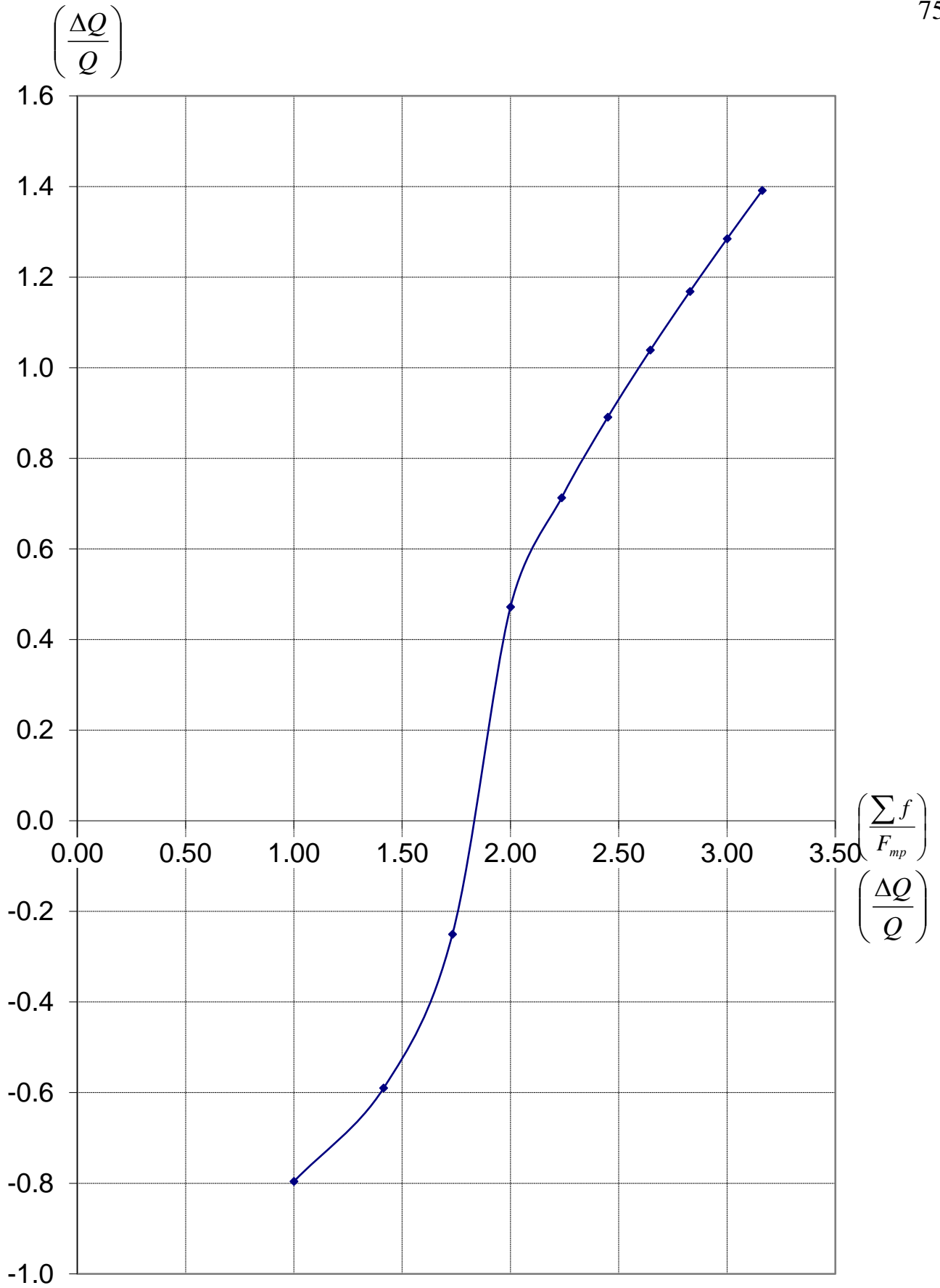


Рисунок 2.8 - Залежність перетоків з бункера в трубу Вентурі при зміні відносної площі вузького перетину труби Вентурі.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ НА ПІДПРИЄМСТВІ

3.1 Основні небезпечні і шкідливі фактори

Метою охорони праці на підприємстві є оцінка обстановки і характеристик трудового процесу в частині його впливу на здоров'я і життя працівника. Для досягнення цього завдання державою встановлено ряд критеріїв оцінки, які допомагають визначити ступінь небезпеки умов праці на підприємствах, які використовують працю найманих працівників.

Залежно від часу і інтенсивності впливу на працівника, виробничі фактори можуть бути небезпечними або шкідливими. При миттєвій дії фактор стає небезпечним, а при тривалому впливі — шкідливим.

Небезпечним називають виробничий фактор, вплив якого на організм працюючого у відповідних умовах праці може призвести до травм або іншого раптового, різкого погіршення стану здоров'я.

Шкідливим називають виробничий фактор, вплив якого на організм працюючого може призводити в певних умовах до захворювання або зниження рівня працездатності.

Законодавство виділяє такі основні шкідливі і небезпечні виробничі фактори в Україні:

1. Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:
 - незадовільний мікроклімат (температура, вологість, вентиляція повітря, інфрачервоне або ультрафіолетове випромінювання) в приміщенні;
 - барометричний тиск;
 - постійні електричні поля і випромінювання;
 - небезпечні іонізуючі випромінювання;
 - високий рівень промислових шумів і вібрацій (місцеві або загальні);
 - недостатнє природне або технічне освітлення в робочих приміщеннях.
2. Хімічні небезпечні виробничі фактори, які передбачають використання небезпечних речовин хімічного походження у виробництві.

3. Біологічні характеристики (мікроорганізми, які знаходяться в бактеріальних медикаментах, патогенні мікроелементи).
4. Загальна організація робочого процесу на підприємстві:
 - тяжкість роботи, яка представлена обсягом фізичних зусиль, навантаженням на опорно-руховий апарат, серцево-судинну, дихальну та інші системи життєдіяльності організму робітника;
 - інтенсивність праці, яка представлена навантаженням на центральну нервову систему, органи чуття, психологічний стан робочого (наприклад, інтелектуальні або емоційні навантаження, монотонність роботи).

Наведений перелік шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища не є вичерпним і може відрізнятися на кожному окремому підприємстві в залежності від специфіки його діяльності. Однак при складанні загальної оцінки умов праці на підприємстві, необхідно пам'ятати, що всі шкідливі і небезпечні фактори виробничого середовища пов'язані загальними рисами, а саме наявністю в них негативних наслідків у формі професійного або виробничого захворювання, короткочасного або постійного зниження працездатності особи, порушення здоров'я робітника або навіть його близьких родичів.

3.2 Засоби захисту від небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

З метою запобігання чи зменшення впливу на працюючих шкідливих і небезпечних виробничих чинників застосовують засоби колективного та індивідуального захисту.

Засоби захисту працюючих за характером їх призначення поділяються на засоби колективного захисту та засоби індивідуального захисту.

Засоби колективного захисту залежно від призначення поділяються на такі класи:

- засоби нормалізації повітряного середовища виробничих приміщень і робочих місць

- засоби нормалізації освітлення виробничих приміщень і робочих місць;
- засоби захисту від іонізуючих, інфрачервоних, ультрафіолетових, електромагнітних, лазерних, магнітних та електричних полів;
- засоби захисту від шуму, вібрації;
- засоби захисту від ураження електричним струмом;
- засоби захисту від дії механічних факторів;
- засоби захисту від хімічних факторів;
- засоби захисту від високих і низьких температур навколишнього середовища.

Засоби індивідуального захисту залежно від призначення поділяються на такі класи:

- ізолюючі костюми;
- засоби захисту органів дихання;
- спеціальне взуття;
- засоби захисту рук;
- засоби захисту очей ;
- засоби захисту обличчя;
- засоби захисту голови;
- засоби захисту від падіння з висоти тощо;
- засоби захисту органів слуху;
- захисні дерматологічні засоби.

ВИСНОВОК

Циклони знайшли широке застосування в промисловості. Існує велика різноманітність робіт, присвячених дослідженню параметрів циклонів і носять приватний, епізодичний характер. Велике розмаїття пропонованих залежностей для розрахунку їх параметрів свідчить про складність розв'язуваної наукової задачі, яка не має поки однозначної відповіді. Незважаючи на адекватність аеродинамічних процесів, що протікають в циклонах, в даний час відсутній єдиний метод розрахунку характеристик найбільш поширених в промисловості циклон-вихрових пристроїв. Відсутність науково-обґрунтованих теоретичних розробок узагальнюючих великий накопичений матеріал по дослідженню роботи різних циклонів перешкоджає розвитку науково-технічного прогресу в області створення і вдосконалення існуючих циклонів.

В результаті проведених в роботі теоретичних досліджень визначені аналітичні залежності основних параметрів пиловловлювача. Ці залежності дають можливість провести експериментальні дослідження пиловловлювача і побудувати струнку методику розрахунку пиловловлювачів нової конструкції, що дозволить конструювати пиловловлювачі з максимальним ККД для конкретних умов роботи.

З роботи слід, що відносна площа мінімального перерізу труби Вентурі визначається величиною витоків k , відносними розмірами отворів, що перепускають пил, $\left(\frac{\sum f}{F_i}\right)$, коефіцієнтом опору пиловловлювача (ξ_{ex}) і втратами повного тиску від входу в пиловловлювач до верхньої вихрової камери ($\Delta P_{nom.cm}^*$).

Для забезпечення перетоків з бункера на вхід в пиловловлювач необхідно витримати таке співвідношення:

$$\left(\frac{\sum f}{F_{mp}}\right) > \sqrt{\xi_{ex} \frac{\Delta P_{nom.cm}^*}{\Delta P_{\psi}}}$$

Правомочність цих міркувань може бути підтверджена відповідними експериментами.

Таким чином, для розрахунку розмірів площі вузького перетину труби Вентурі необхідно вміти розраховувати коефіцієнт опору пиловловлювача ξ_{ex} і втрати повного тиску від входу в пиловловлювач до перфорованих отворів вихривий камери пиловловлювача.

Запропонований, в даній роботі циклон, відноситься до пиловідокремлювачів з високим коефіцієнтом корисної дії. Такі пиловловлювачі можуть бути використані для уловлювання дорогого пилу. Наприклад, на підприємствах з виробництва борошна, цукру, а також з переробки або використання дорогих матеріалів і сплавів таких як срібло, вольфрам, молібден і ін.

ДЖЕРЕЛА ПОСИЛАНЬ

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 736 с.
2. Vatin N.I., Sagittarius K.I. (2017). Air purification using cyclone type apparatuses. *Young Scientist*. Issue 13, p. 165-168
3. Novodvorskyi, Volodymyr, and Andrii Stepaniuk. "Simulation of the collecting process in a cyclone apparatus of a new design." *ScienceRise* 10.10 (2018): 33-36.
4. Чейлытко, А. А. Влияние геометрических размеров вихревого аппарата на его аэродинамическое сопротивление [Текст] / А. А. Чейлытко // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – 2013. – №6/8 (66). – С. 45 – 49.
5. Shelukh Yu.E. (2012). Modern methods of air purification from industrial types of dust. *Journal "heat power"*, Issue 10, p. 146-174.
6. Malgin A.D., Scriabin G.M. (2019) Purification of gases and air from dust in the chemical industry. *Journal of Modern High Technology*, Issue 12, p. 199-203.
7. Temnikova E.Yu. (2010) Study of the efficiency of dust collection in a cyclone with embossed surfaces. *Journal of Modern High Technology*, Issue 8, p. 10-21.
8. Василевский М.В., Зыков Е.Г. методы повышения систем обеспыливания газов с групповыми циклонными аппаратами в малой энергетике. – Промышленная энергетика, 2004, №9.
9. Защита атмосферы от выбросов энергообъектов / Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1992. — 176 с.
10. Денисов С.И. Улавливание и утилизация пылей и газов./Учебное пособие для вузов, – М.: Металлургия, 1991.— 420 с.
11. Азаров В.Н. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) / В.Н. Азаров, В.Ю. Юркьян, Н.М. Сергина, А.В. Ковалева // Законодательная и прикладная метрология. 2014. – № 1. – С.46 – 48.

12. Азаров В.Н. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов / В.Н. Азаров, Н.М. Сергина // Строительные материалы. 2003. № 8. – 14 – 15.

13. Азаров, В.Н. Результаты испытаний аппаратов ПВ ВЗП с раскручивателями в системах обеспыливающей вентиляции / В.Н. Азаров, А.С. Лукьянсков, Ю.Г. Самарская // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. – 2009. – № 14. – С. 151 – 153.

14. Азарський К.І. Локалізація екологічної загрози забруднення атмосфери від пилу спалювання вугілля на ТЕС : дис. ...канд. техн. наук : 21.06.01 / Азарський Костянтин Іванович. – Львів, 2008. – 206 с.

15. Ананьев В.А. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В.А. Ананьев, Л.Н. Балужева, А.Д. Гальперин и др. – М.: Евроклимат, изд. Арина, 2000. – 416 с. 313

16. Анжеуров Н.М. Миграция вентиляционных выбросов в атмосфере / Н.М. Анжеуров, В.И. Энтин, Е.В. Асмолова [и др.] // Тез. докл. и прогр. науч. техн. конф. «Проблемы экополиса», Италия, Флоренция, 22 – 29 апр. 2000. – М., 2000. – С. 20 – 23.

17. Асламова В.С. Характер движения частиц пыли в прямооточном циклоне с промежуточным отбором пыли / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Т.Н. Мусева // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т.310. – № 1. – С. 166 – 171.

18. Асламова В.С. Автоматизированная система технологического расчета циклонов / В.С. Асламова, А.А. Жабей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 1. – С. 59 – 63.

19. Асламова В.С. Процесс сепарации в высокопроизводительных прямооточных циклонах и методы их расчета: дис.. докт. техн. наук: 05.17.08 / Асламова Вера Сергеевна. – Томск, 2009. – 377 с.

20. Асламова В.С. Прямоточные циклоны. Теория, расчет, практика / В.С. Асламова. – Ангарск: А Г Т А, 2008. – 233 с.

21. Асламова В.С. Расчет гидравлического сопротивления прямооточного циклона с промежуточным отбором / В.С. Асламова // Известия Томского политехнического университета. 2008. – Т.313. – № 4. Энергетика. С. 54 – 60.

22. Асламова В.С. Сопоставление результатов расчета коэффициента гидравлического сопротивления и потерь давления прямооточного циклона с промежуточным отбором с экспериментом / В.С. Асламова // Известия Томского политехнического университета. – Т.313. – № 4. Энергетика. – С. 50 – 53.

23. Асламова В.С. Эмпирический метод расчета эффективности очистки прямооточных циклонов при масштабном переходе / В.С. Асламова, А.А. Асламов, А.А. Жабей, М.И. Аршинский // Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология». – 2008. – Т. 51. – № 12. – С. 80 – 83.

24. Асламова, В.С. Вероятностно-статистическое моделирование эффективности сепарации частиц пыли в прямооточном циклоне / В.С. Асламова, А.А. Асламов, П.К. Ляпустин // Вестник ИрГТУ. 2007. – Т. 29. – № 1. – С. 27 – 30.

25. Асламова, В.С. Статистическое моделирование эффективности пылеулавливания прямооточных пылеуловителей при масштабном переходе / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Н.А. Брагин, Т.Н. Мусева, А.А.Жабей, А.Н. Гредюшко //Химическая промышленность сегодня. – 2008. – 3 2 – С. 42 – 48.

26. Асламова, В.С. Универсальный метод расчета эффективности пылеулавливания циклонов / В.С. Асламова, А.А. Асламов, Т.Н. Мусева, А.А. Жабей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 1. – С. 34– 37.

27. Асмолова Е.В. Совершенствование процессов и аппаратов сухого пылеулавливания аэродинамическими способами (в производстве огнеупоров): автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.17.08, Процессы и аппараты хим. технологии. / Е.В. Асмолова – Тамбов, 2004 – 16 с.

28. Батлук В.А. Наукові основи створення високоефективного пиловловлюючого обладнання : дис. докт. техн. наук: 05.05.02 / Батлук Вікторія Арсеніївна. – Львів, 2001. – 370 с.

29. Батлук В.А. Математична модель процесу очищення запиленого потоку у відцентрово-інерційних пиловловлювачах / В.А. Батлук, І.В. Проскуріна, А.В. Ляшеник // Промислова гідравліка і пневматика. – 2010. – № 1 (27). С. 31 – 36.

30. Батлук В.А. Математична модель руху двофазного потоку в пристроях очищення запиленого потоку в технологіях машинобудування / В.А. Батлук, І.В. Проскуріна, В.В. Батлук // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – С.87 – 93.

31. Белевицкий А.М. Проектирование газоочистительных сооружений / А.М. Белевицкий – Л.: Химия, 1990. – 288 с.

32. Белоусов А.С. Поля скоростей в вихревых аппаратах / А.С. Белоусов, Б.С. Сажин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2006, № 2. – С. 100–105.

33. Майструк, Володимир, Роман Гаврилів, and Павло Майструк. "АНАЛІЗ ШВИДКОСТІ ГАЗОВОГО ПОТОКУ В ЦИКЛОНІ ІЗ СПІРАЛЬНИМ НАПРАВЛЯЮЧИМ АПАРАТОМ." *Сучасні тенденції розвитку освіти й науки: проблеми та перспективи* (2019): 274.

34. Дадак, Ю. Р., Л. О. Тисовський, and А. В. Ляшеник. "Математична модель турбулентного руху запиленого потоку повітря у циклоні." *Науковий вісник НЛТУ України* 26.8 (2016).

35. Куц, В., and Володимир Богданович Каспрук. "Жалюзійно-вихрові апарати як етап вдосконалення відцентрових пиловловлювачів." *Матеріали ХІХ наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя* (2016): 210-211.

36. Каспрук, Володимир Богданович. "Порівняльна характеристика вихрових і відцентрових пиловловлювачів." *Тези доповідей ІV Міжнародної науково-технічної конференції „Стан і перспективи харчової науки та промисловості“* (2017): 104-104.

37. Куц В.П. Оцінка роздільних властивостей циклона з ступеневим відведенням пилу / В.П. Куц, О.М. Марціяш // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів, 2006. – Вип. 16.1. – С. 173 – 181.

38. Куц В.П. Розрахунок ефективності пиловловлювання батарейного циклона з жалюзійними елементами / В.П. Куц // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2006. – № 3. – С. 205 – 209.

39. Куц В.П. Ступеневе відведення пилу як шлях підвищення ефективності відцентрових пиловловлювачів // В.П. Куц // Вісник НУ «Львівська політехніка» № 553 «Хімія, технологія речовин та їх застосування». – Львів, 2006. – С. 197 – 200.

40. Куц В.П. Розрахунок ефективності пиловловлювання в жалюзійно-вихровому апараті / В.П. Куц, В.Б. Каспрук, О.М. Марціяш // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів, 2007. – Вип. 173, – С. 126 – 132.

41. Куц В.П. Пристрої для визначення дисперсного складу подрібнених матеріалів / В.П. Куц // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2008. – Вип. 32. – С. 144 – 147.

42. Куц В.П. Апарат для мокрого пиловловлювання: доцільність і передумови створення / В.П. Куц, Г.П. Горішна, О.М. Марціяш // Науковий вісник НЛТУ України. – Львів, 2008. – Вип. 18.4. – С. 98 – 102.

43. Куц В.П. Зниження затрат на очистку запиленних потоків в апаратах комбінованої дії / В.П. Куц, О.М. Марціяш // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2009. – Вип. 35. Т.2. – С. 50 – 52. 326

44. Куц В.П. Методика розрахунку, конструювання і випробувань дослідного зразка пінного пиловловлювача / В. Куц, Г. Горішна, О. Марціяш // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2008. – № 2. – С. 190 – 196.

45. Куц В.П. Можливі шляхи покращення роботи пінних пиловловлювачів / В.П. Куц, Г.П. Горішна, О.М. Марціяш / Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2008. – Вип. 32 – С. 113 – 116.

46. Куц В.П. Про застосування пиловловлювачів з жалюзійним відводом повітря / В.П. Куц // Сільськогосподарські машини. Збірник наукових статей Луцького національного технічного університету. – Луцьк, 2009. – Вип. 18. – С. 217 – 221.

47. Куц В.П. Спосіб очистки газів від тонковолокнистого пилу / В.П. Куц, С.М. Балабан, В.М. Чиж, Я.М. Ханик // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2010. – Вип. 37. – С. 281 – 284.

48. Куц В.П. Порівняльна оцінка роботи пиловловлювачів з жалюзійним відводом повітря / В.П. Куц // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса, 2011. – Вип. 39. Т. 2. – С. 134 – 140.

49. 153. Марціяш О.М. Очистка пилогазових потоків в циклоні з ступеневим відведенням пилу: дис. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Марціяш Орест Михайлович. – Львів, 2006. – 170 с.

50. Патент на корисну модель № 35761 Україна, МПК G01N 15/04. Пристрій для визначення дисперсного складу подрібнених матеріалів / Куц В.П. – № 4 2008 02738; заявл. 03.03.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.

51. Патент на корисну модель № 39426 Україна, МПК B01D 49/00. Пристрій для видалення аерозольних частинок із газового потоку / Куц В.П. – № 4 2008 11742; заявл. 09.09.2008; опубл. 25.02.2009, Бюл. № 4.