



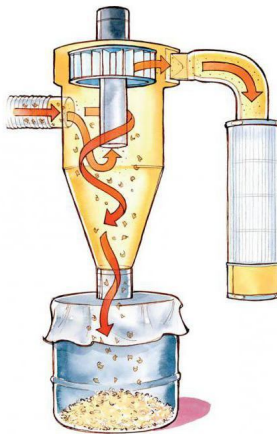
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

О.Р. Якуба

Савченко-Перерва М.Ю.
Сабадаш С.М.

**МЕХАНІЧНІ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ
ТА ФІЛЬТРИ В ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО
ОЧИЩЕННЯ ХАРЧОВИХ ПИЛОПОДІБНИХ
ПРОДУКТІВ**

Монографія



Суми, СНАУ - 2017

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський національний аграрний університет

**МЕХАНІЧНІ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ
ТА ФІЛЬТРИ В ТЕХНОЛОГІЇ КОМПЛЕКСНОГО
ОЧИЩЕННЯ ХАРЧОВИХ ПИЛОПОДІБНИХ
ПРОДУКТІВ**

Монографія

Суми, СНАУ - 2017

УДК 621.928.37
ББК 36.81-5

Редакційна колегія:

Якуба О. Р.

Савченко-Перерва М. Ю., Сабадаш С. М.

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. В.Б. Тарельнік
д-р техн. наук, проф. І.В. Склабінський
к-т техн. наук, доц. М.П. Юхименко

Рекомендовано до друку вченою радою СНАУ,
протокол № 11 від 27. 02. 2017 р.

Якуба О.Р. Механічні пиловловлювачі та фільтри в технології комплексного очищення харчових пилоподібних продуктів: монографія / **О.Р. Якуба**, М. Ю. Савченко-Перерва, С. М. Сабадаш. – С.: СНАУ, 2017. – 203 с.

ISBN 978-617-593-049-6

У монографії на основі використання широкого кола джерел вперше комплексно проаналізовано механічні пиловловлювачі в харчових виробництвах. Отримано математичні залежності для розрахунку гідравлічних втрат та фракційної ефективності відцентрових циліндричних пиловловлювачів. Монографія призначена для наукових співробітників і практичних працівників харчових галузей промисловості.

УДК 621.928.37
ББК 36.81-5

ISBN 978-617-593-049-6 © **О.Р. Якуба**, М.Ю. Савченко-Перерва, С.М. Сабадаш, 2017.
© СНАУ, 2017

ЗМІСТ

| | |
|---|-----|
| ПЕРЕДМОВА | 7 |
| ЧАСТИНА 1 ОСАДЖЕННЯ ЧАСТИНОК ПИЛУ | 16 |
| РОЗДІЛ 1 | 16 |
| ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ | 16 |
| 1.1. Механізм осадження частинок пилу | 16 |
| 1.2. Гравітаційне осадження частинок | 16 |
| 1.3. Інерційне осадження пилу | 19 |
| 1.4. Відцентрове осадження частинок пилу | 22 |
| 1.5. Ефективність осадження частинок під дією різних факторів | 25 |
| 1.6. Коагуляція частинок у зваженому шарі | 30 |
| ЧАСТИНА 2 ТЕХНОЛОГІЇ ТА АПАРАТУРНЕ | |
| ОФОРМЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ | 35 |
| РОЗДІЛ 2 | |
| СУХІ МЕХАНІЧНІ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ | 35 |
| 2.1. Пилоосаджувальні камери | 35 |
| 2.2. Інерційні пиловловлювачі | 37 |
| 2.3. Відцентрові пиловловлювачі | 40 |
| 2.4. Вихрові пиловловлювачі | 48 |
| 2.5. Динамічні пиловловлювачі | 50 |
| РОЗДІЛ 3 | |
| ФІЛЬТРИ ТА ЕЛЕКТРОФІЛЬТРИ | 54 |
| 3.1. Загальні відомості про фільтрацію, види фільтрів і методи очищення | 54 |
| 3.2. Основні властивості фільтрувальних матеріалів | 59 |
| 3.3. Фізичні особливості електричного очищення газів | 73 |
| 3.4. Сухі й мокрі електрофільтри | 79 |
| РОЗДІЛ 4 | |
| КОНСТРУКЦІЇ ВИХРОВИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ | 82 |
| 4.1. Апарати із зустрічними закрученими потоками | 82 |
| 4.2. Різновиди конструкцій вихрових пиловловлювачів | 84 |
| 4.3. Конструкції пиловловлювачів, розроблені окремими авторами в порядку зростання часу | 88 |
| 4.4. Патенти зарубіжних винахідників | 111 |
| 4.5. Економічні аспекти пиловловлювання | 115 |

| | |
|---|-----|
| РОЗДІЛ 5 | |
| ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУХИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ | 119 |
| 5.1. Розрахунок полів швидкостей у циліндричних апаратах із зустрічними закрученими потоками (ЗЗП) | 119 |
| 5.2. Розрахунок полів швидкостей у циліндричних протитечних апаратах | 126 |
| 5.3. Поле швидкостей у конічних протитечних апаратах | 135 |
| 5.4. Розрахунок ефективності відцентрових циліндричних пиловловлювачів – апаратів із зустрічними закрученими потоками | 140 |
| 5.5. Розрахунок ефективності протитечних відцентрових пиловловлювачів (циклонів) | 150 |
| 5.6. Удосконалення моделей розрахунку конічних апаратів | 157 |
| 5.7. Розрахунок втрати тиску в апаратах із зустрічними закрученими потоками | 163 |
| 5.7.1. Розрахунки опору у вторинному потоці | 165 |
| 5.7.3. Розрахунки втрат тиску в протитечних пиловловлювачах-циклонах. Циліндричні циклони | 172 |
| 5.7.4. Розрахунки втрат тиску в конічних циклонах | 176 |
| РОЗДІЛ 6 | |
| ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ ІЗ ЗАКРУЧЕНИМИ ПОТОКАМИ | 180 |
| 6.1. Сепараційна спроможність відцентрових пиловловлювачів | 180 |
| 6.2. Сепараційна спроможність апаратів із зустрічними закрученими потоками циліндричного типу | 181 |
| 6.3. Сепараційна спроможність АЗЗП конічного типу | 183 |
| 6.4. Сепараційна спроможність конічних циклонів | 185 |
| 6.5. Сепараційна спроможність циклонів без бункера | 185 |
| 6.6. Енергетичні показники відцентрових пиловловлювачів | 181 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 190 |

СЛОВА ВДЯЧНОСТІ

Редакційна колегія висловлює велику шану та вдячність за безмежний досвід та великий внесок в створенні та написанні монографії головному редактору, фахівцю з наукових напрямків пиловловлювання та сушіння, науковому керівнику при написанні кандидатських дисертацій –

Якубі Олександрю Радіоновичу

ПЕРЕДМОВА

Пиловлівлювання – дуже важливий процес, вихід готового продукту в кінці залежить від ефективності відокремлення дисперсних частинок із запилених газів [1].

Очищення газів від пиловидних частинок проводиться як з метою захисту атмосфери від пилових забруднень, так і технологічної потреби виділення цінних пилоподібних харчових продуктів.

Промислові гази й повітря, утримуючи зважені тверді або рідинні частинки, утворюють двофазні системи, що складаються з безперервного (суцільного) середовища та дисперсної фази. Суцільною фазою в цьому випадку є гази, дисперсною – тверді частинки або краплі рідини. Через подібність двофазній системі отримали назву аеродисперсних систем або аерозолів [2,3].

Упродовж тривалого часу техніка пиловвлівлювання різко відставала від розвитку промислового виробництва. У цей період забруднення повітряного середовища сприймалося лише як порушення комфортності. Існувала невідповідність між оцінкою важливості проблеми та складністю її вирішення.

Дійсно, для прогнозування поведінки пилових частинок необхідно брати до уваги найсучасні відомості з вищих розділів механіки й аеродинаміки. Експериментальні дослідження потребують складної лабораторної техніки високої точності й чутливості.

Пил утворюється в численних технологічних процесах, наприклад, під час змішування харчових продуктів і молочної суміші, у процесі переміщення й транспортування матеріалів, під час подрібнення матеріалів для вловлювання цукрового пилу, казеїну, розчинної кави, какао, барди, сухого жому, сухого молока та інших харчових пилоподібних продуктів після сушарок [4], борошна з пневмотранспортної лінії, і в якості першого

ступеня очищення в системах аспірації та пневмотранспорту зернопереробних підприємств.

Актуальним питанням подальшого розвитку провідних галузей є розширення зовнішнього ринку збуту продукції, тому необхідно провести реконструкцію і технологічну модернізацію виробничих потужностей підприємств харчової промисловості (очищення сухої речовини в наш час дуже актуальна, тому що по-перше – дороге обладнання, а по-друге – немає 100% виходу чистого продукту) і особливо машинобудування, яке випускає устаткування для харчової промисловості, сільськогосподарського машинобудування, виробничої інфраструктури.

Ефективність вихрових апаратів відзначається всіма авторами, які проводять дослідження. Однак існують фактори, які ускладнюють процес застосування вихрових технологій. Незважаючи на розширення їх впровадження, немає даних про повну заміну традиційних технологій (відстоювання, фільтрування, використання прямоочних апаратів тощо) вихровими хоча б в одній із галузей промисловості. Це пояснюється, зокрема, відсутністю надійних методів розрахунку процесів, які відбуваються в вихрових камерах, що говорить про необхідність продовження їх вивчення.

ЗАГАЛЬНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОСНОВНІ ЗАКОНИ ГІДРОДИНАМІКИ ГАЗОВОГО ПОТОКУ

Частинки аеродисперсних систем постійно рухаються відносно середовища й один одного. У залежності від розмірів частинок утворюється полідисперсний пил, змінюються закони, що визначають опір руху частинок у нерухомому повітрі або опір нерухомих частинок прямолінійно повітрю, що рухається.

Рух дуже дрібних частинок розміром у декілька мілімікрон (10^{-9} м) не порушує розподіл швидкостей молекул повітря й не утворює в ньому ніяких течій. Рух частинок розміром 1 мкм і більше утворюють у повітрі течії, обумовлюючи йому аеродинамічний опір.

При рівномірному русі цей опір виражають залежністю:

$$F = \psi \frac{\pi d^2}{4} \rho_n \cdot \frac{V_{oc}^2}{2}, \quad (1)$$

де ψ – коефіцієнт аеродинамічного опору, що залежить від числа $Re = \frac{V \cdot d \cdot \rho_n}{\mu}$,

V – швидкість руху частинки, м/с; d – діаметр частинки, м; ρ_n – густина повітря, кг/м.в.куб.; μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с.

Частинки такої величини розрізняють за допомогою мікроскопа, а більші – неозброєним оком. Для малих та постійних швидкостей руху і невеликих розмірів частинок ($0 < Re < 1$) коефіцієнт аеродинамічного опору ψ вважають рівним $\psi = \frac{24}{Re}$ і опір для одного руху називають ламінарним, визначаючи за формулою Стокса:

$$F = 3\pi d \mu V_{ч}. \quad (2)$$

Сила F у даному випадку складається з двох компонентів. Один із них є рівнодійною нормальних сил, тобто силою тиску повітря на сферу, що дорівнює $\pi d \mu V_{\text{ч}}$, у другій, відповідно, рівнодійною дотичних напруг, тобто силою тертя повітря об поверхню сфери, що дорівнює $3\pi d \mu V_{\text{ч}}$.

Використання залежності Стокса полегшує інтегрування диференціальних рівнянь руху частинок і може призвести до помилок і в ширшому діапазоні значень числа Re , так як звичайно досліджуються явища, що пов'язані з рухом найменших із частинок системи, що ще більш або менш ефективно сепаруються. Це зумовлює сепарацію в потоці, а також широке використання формули Стокса при дослідженні питань, пов'язаних із рухом пилових частинок у повітрі.

Формула Стокса була одержана з припущення, що сили інерції повітря, які витискаються частинкою, дуже малі. Ураховуючи інерційні складові, із рівнянь Нав'є-Стокса отримали формулу [3].

$$\psi = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re \right). \quad (3)$$

Формула (3) може використовуватися при $Re < 5$.

У випадку, якщо досліджується рух, що характеризується надто великими значеннями числа Re і широким інтервалом його змін, використовують формулу Клячко [4].

$$\psi = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}. \quad (4)$$

В інтервалі $3 < Re < 400$ ця формула дає похибку до 2%, при $Re = 1000$ похибка досягає 4%.

При більших значеннях числа Re значна частина опору створюється тиском повітря на поверхню частинок і тільки незначна частина поверховим тертям. Опір змінюється пропорційно \mathcal{G}_r^n , де n безперервно підвищується, із зростанням Re опір визначається залежністю Ньютона [3]:

$$F = 0,055\pi\mu_n d_r^2 \mathcal{G}_r^2. \quad (5)$$

Під час інженерних розрахунках по наведених залежностях рахується, що частинки мають ідеальні сфери. В окремих випадках зважають на вплив дійсної форми частинок та форму їх поверхні. Звичайно, для цього вводять у формулу Стокса діаметр еквівалентної частинки, тобто такої, що осідає з тією ж швидкістю, що й розглядається [1,5].

При аналізах дисперсного складу аерозолів та порошоків методами повітряної або рідинної сегментації його виражають еквівалентним діаметром частинок.

ШВИДКІСТЬ ОСАДЖЕННЯ

Падаючи, аерозольні частинки швидко досягають такої постійної швидкості V_0 , під час якої аеродинамічний опір середовища стає рівним його ефективній вазі без урахування Архімедової сили підйому:

$$3\pi\mu_n \cdot d \cdot V_0 = \frac{\pi}{6} d^3 \cdot g(\rho - \rho_n), \quad (6)$$

де ρ , ρ_n , – густина відповідно твердих частинок і повітря, кг/м^3 ;

μ_n – динамічна в'язкість повітря, $\text{Па}\cdot\text{с/м}^2$.

Так як ρ_n дуже мало в порівнянні з ρ частинок, то його значенням можна знехтувати, одержимо [6]:

$$V_0 = \frac{d^2 g \cdot \rho}{18\mu_n}. \quad (7)$$

Для газів або рідин у яких підвищена густина:

$$V_0 = \frac{gd^2(\rho - \rho_n)}{18\mu_n}. \quad (8)$$

Величину V_0 часто називають швидкістю витання, тому що вона відповідає вертикальному потоку повітря, в якому частинка знаходиться у зваженому стані – витає. Швидкість витання частинок у повітрі за нормальних умов подається у вигляді графіків [3,7]. На відміну від залежності (8), що справедлива для діаметрів частинок $d < 60$ мкм (у повітрі) та $Re < 1$, графіки охоплюють й інші режими й ними можна користуватися для частинок розміром до 300 мкм [7]. Ширший діапазон розміру частинок дає залежність О.М. Тодеса [8].

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0.61\sqrt{Ar}}, \quad Ar = \frac{gd^3(\rho_T - \rho_n)}{V_{ж}^2 \cdot \rho_n}, \quad (9,10)$$

де Ar – критерій Архімеда.

ВЛАСТИВОСТІ ЗВАЖЕНИХ ЧАСТИНОК

Густина частинок. Першою основною характерною властивістю частинок є густина. Розрізняють густини: дійсну, насипну й гадану. Насипна густина, на відміну від дійсної, враховує повітряний прошарок між частинами пилу. При зменшенні частинок насипна густина зростає в 1,2-1,5 рази. Гадана густина показує відношення маси частинки до об'єму, що включає також порожнини й нерівності.

Дисперсність частинок. Розмір частинок є основним параметром. Вибір пиловловлювача визначається, головним чином, дисперсним складом пилу, що вловлюється. В процесі коагуляції первинні частинки пилу об'єднуються в агломерати, збільшуються. Тому в

техніці газоочищення велике значення має так званий Стоксовий розмір, тобто діаметр сферичної частинки, що має таку ж швидкість осадження, як і несферична частинка або агломерат. Дисперсний склад пилу можна подати у вигляді складу за числом або масою частинок різних фракцій. Фракцією називають відносну долю частинок, розміри яких знаходяться у визначеному інтервалі значень, прийнятих у якості нижньої та верхньої межі.

Дані методів аналізу демонструють у вигляді таблиць, в яких показано отримання частинок у відсотках від загальної ваги пилу або від загального числа частинок чи від їх розмірів. За аналогією, дані ситового аналізу для великих частинок \bar{b} , що називаються залишком і позначаються R , а дрібніші за \bar{b} називаються проходом і позначаються D . Функція, що при будь-якому фіксованому \bar{b} дорівнює відношенню ваги частинок, діаметр яких менший (більший) за \bar{b} , до загальної маси всіх частинок пилу, вираженого у відсотках, називається функцією розподілу за проходом $D(\bar{b})$ або за залишком $R(\bar{b})$.

Функція густини розподілу ваги частинок пилу за їх діаметрами $\varphi(\bar{b})$ є похідною функцією розподілу

$$\varphi(\bar{b}) = \frac{dD(\bar{b})}{d(\bar{b})}. \text{ Криву функції густини розподілу можна}$$

приблизно знайти шляхом побудови гістограми на основі експериментальних даних. За розміром обраної фракції будують прямокутники. Площа кожного прямокутника повинна дорівнювати отримуванню даної фракції у відсотках. Тому по осі ординат відкладається частка від поділу складу фракції на діапазон розмірів частинок, тобто на різниці між найбільшим та найменшим розмірами частинок даної фракції $\frac{\varphi(\bar{b})}{\text{мкм}}$, %. Загальна площа всіх прямокутників складає 100%. Крива густини розподілу є істинною густини розподілу.

Для аналітичного опису кривих розподілу густини, розподілу пилу й порошкових матеріалів були запропоновані різні формули. Найбільш обґрунтованим і широко використовуваним є логарифмічний нормальний розподіл, що відрізняється від нормального Гаусовського розподілу тим, що в якості аргумента замість діаметру частинок береться його логарифм $\lg(\bar{b})$:

$$D = (\bar{b}) = \phi(x) = \frac{100}{2\pi} \int_{-\infty}^x l^{\frac{y^2}{2}} dy, \quad (11)$$

де

$$x = (\lg \bar{b} - \lg \bar{b}_{50}) / \lg \bar{b}, \quad (12)$$

\bar{b}_{50} – медіанний діаметр, при якому вага всіх частинок пилу, менших або більших \bar{b}_{50} , складає 50%; $\lg \bar{b}$ – стандартний відхил величини $\lg \bar{b}$; $\lg^2 \bar{b}$ – дисперсія величини.

Логарифмічно-порівняльний розподіл зручно зображати на логарифмічно-ймовірній системі координат: по осі абсцис відкидають логарифми діаметрів частинок та проставляють значення \bar{b} , по осі ординат відкладають величину X та проставляють значення функції $\Phi(x)$ або $D(\bar{b})$. Викреслений за такою схемою графік логарифмічного нормального розподілу частинок пилу зображується прямолінійно. Інтеграл (11) табульований. Величина $\Phi(x)$, відповідаючи значенням x , знаходиться з таблиці [8].

Величину \bar{b} , що характеризує стандартне відхилення $\lg \bar{b}$ та дисперсію $\lg^2 \bar{b}$, логарифми діаметрів частинок $\lg \bar{b}$ можна розрахувати з рівняння (12), якщо $x = \pm 1$: $\lg \bar{b} = \pm (\lg \bar{b} - \lg \bar{b}_{50})$.

З таблиць можна знайти, що значення $x = \pm 1$ відповідає $D(\bar{b}) = 84$ та $D(\bar{b}) = 16$. Тому $\bar{b} = \bar{b} \cdot 84 / \bar{b} \cdot 50 = \bar{b} \cdot 50 / \bar{b} \cdot 16$.

Методи гранулометричного складу. Для гранулометричного складу частинок розміром більше 40 мкм використовують сита. У державах колишнього СНД

вони використовуються розміром від 15 мкм. Спеціальні мікросита [9] дозволяють здійснити ситовий аналіз від 5 мкм.

Огляди під мікроскопом без визначення розподілу частинок за розміром – метод швидкий і дає уявлення про вигляд частинок. Але надалі, звичайно, необхідне виготовлення суспензії та подальше випарювання декількох крапель на пластинці. Кращим методом, що дозволяє виключити подвійне диспергування, є відбір проб на клейку пластину. При використанні мікроскопів необхідні окуляри із сітками, що спрощує оцінку розмірів частинок пилу.

Струйні імпактори призначені для визначення дисперсного складу зваженого в повітрі пилу шляхом інерційної сепарації частинок на пластинці при обтіканні її струменем аерозолю. Імпактор виконано у вигляді металевого корпусу, в якому вставлено декілька (до 14) дисків. У кожному диску наявні отвори. Кожний диск є ступенем розділення.

На першому ступені вловлюються найбільші частинки, на наступних – усі дрібні. Фільтр на виході вловлює всі частинки, що пройшли через прилад [7, 10].

ЧАСТИНА 1

ОСАДЖЕННЯ ЧАСТИНОК ПИЛУ

РОЗДІЛ 1

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ

1.1. Механізм осадження частинок пилу

Робота будь-якого пиловловлювача ґрунтується на використанні одного або декількох механізмів осадження зважених у газах частинок. У виробництві харчових продуктів використовуються такі механізми осадження:

- гравітаційне осадження, що відбувається внаслідок вертикального осадження частинок під дією сили тяжіння при проходженні через газоочисний апарат;

- осадження під дією відцентрових сил, що використовується при криволінійному русі аеродисперсного потоку, де розвиваються відцентрові сили, під дією яких частинки відкидаються на поверхні осадження;

- інерційне осадження, що здійснюється у тому випадку, коли маса частинок або швидкість їх руху дуже значні, тому частинки не можуть слідувати разом із газом по лініях потоку при огинанні перешкод, а за інерцією продовжують свій рух і осідають на поверхнях осадження.

1.2. Гравітаційне осадження частинок

У гравітаційних пиловловлювачах виділення зважених частинок із газоподібного середовища відбувається, головним чином, під дією сили тяжіння. Фізичні характеристики руху в газовому або рідинному середовищі залежать не тільки від властивостей середовища, а й від умов обтікання, тобто від величини пограничного, зв'язаного з ним закону опору.

При кількісному визначенні гідравлічних опорів твердих частинок, які рухаються в потоці рідини чи газу або обтікаються цим потоком, перш за все, необхідно визначити зв'язок між утратою кінетичної енергії та режимом руху.

Узагалі сила опору, яка проявляється в потоці, що рухається, виражається рівнянням, записаному у вигляді [11]:

$$F = \psi \cdot f \cdot \rho_n \cdot \frac{V^2}{2}, \quad (1.1)$$

де f – площа проекції частинки на поверхню, перпендикулярну напрямленню його руху, м^2 ; ρ – густина середовища (повітря), $\text{кг}/\text{м}^3$; V – швидкість віддалення від частинки, $\text{м}/\text{с}$; ψ – коефіцієнт пропорційності, що містить загальний коефіцієнт опору.

Рівняння (1.1) пов'язує перепад тиску (F/f) із часткою кінетичної енергії, яка витрачається на опір руху, так як певна сила опору F може бути подана сумою сил лобового опору, опору тертя та загального опору.

$$F = F_A + F_{\text{тер} \rightarrow 0}. \quad (1.2)$$

Коефіцієнт опору ξ може бути виражений рівнянням:

$$\xi = \xi + \xi_{\text{тр}}, \quad (1.3)$$

де ξ – коефіцієнт лобового опору або коефіцієнт форми; $\xi_{\text{тр}}$ – коефіцієнт тертя.

При ламінарній течії пластинка плавно обтікається потоком й енергія витрачається, в основному, тільки на переборення тертя. При турбулентній течії починають проявлятися сили інерції, зі збільшенням швидкості збільшується лобовий вітер, що залежить від форми обтічної поверхні. З досягненням деякого значення числа

Рейнольдса опір тертя можна зневажати й основні затрати енергії потоку будуть витрачатися на переборення лобового опору.

Теоретично закон опору під час руху кульової частинки при малих значеннях критерія Рейнольдса може бути поданий у вигляді ряду [11, с. 121].

$$\zeta = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{3}{16} \text{Re} - \frac{19}{1280} \text{Re}^2 + \dots \right). \quad (1.4)$$

Рішення, що враховує тільки перший тип руху, відповідає формулі Стокса. Експериментальні дані можуть бути виражені степеневою залежністю $\zeta = A/\text{Re}^n$. Для закону Стокса $A=24$, $n=1$.

У ламінарній течії $\text{Re} < 2$ дія сили опору підкоряється закону Стокса у відповідності до рішення рівняння Нов'є-Стокса та рівняння нерозривності. Для сферичних частинок коефіцієнт опору розраховується за рівнянням $\zeta = 24/\text{Re}$. У проміжному режимі обтікання $2 < \text{Re} < 5 \cdot 10^2$ коефіцієнт опору характеризується меншою залежністю опору від критерію Рейнольдса [11, с. 123].

$$\zeta = \frac{18,5}{\text{Re}^{0,6}}. \quad (1.5)$$

При розвиненому турбулентному режимі в межах $5 \cdot 10^2 < \text{Re} < 2^5$ опором тертя можна зневажати, а лобовий опір починає переважати. Такий режим називають автомодельним, а коефіцієнт опору $\zeta = 0,44$. Цій межі відповідає квадратичний закон Ньютона $F \approx V_0^2$.

Щойно розглянутий закон опору середовища належить до вільного руху, тобто без впливу сусідніх частинок, що знаходяться в середовищі, і для опороподібних частинок. Опір реальних частинок, форма яких відрізняється від шару, додатково залежить від фактора форми φ (коефіцієнта сферичності). Фактор

форми φ для частинок неправильної форми визначається як відношення поверхні кола $f_{\text{ш}}$ такого ж об'єму, як і реальна частинка, до поверхні частинки f .

$$\varphi = \frac{f_{\text{ш}}}{f} = 4,878 \cdot V^{2/3} / f. \quad (1.6)$$

Поверхня шару з об'ємом, рівним об'єму частинки, визначається за еквівалентним діаметром:

$$d_e = \sqrt[3]{6V_r / \pi}. \quad (1.7)$$

Значення фактора форми для різних тіл наведено в таблиці [11, с. 124].

Коефіцієнт опору для неоднорідних частинок можна визначити по залежності:

$$\xi = A / \text{Re}, \quad (1.8)$$

де $A=f(\varphi)$.

Для ламінарного обтікання несферичних частинок можна використати емпіричне рівняння:

$$A = \frac{24}{0,843 \lg\left(\frac{\varphi}{0,005}\right)}. \quad (1.9)$$

Для турбулентного обтікання коефіцієнт опору не залежить від тиску Re , а тільки від фактора форми:

$$\xi = 5,31 - 4,88\varphi. \quad (1.10)$$

Для шароподібних частинок ($\varphi=1$) одержимо $\xi=0,43$.

1.3. Інерційне осадження пилу

Одним із найважливіших результатів взаємодії пилових частинок із захоплюючим газовим потоком за

наявності зовнішніх сил є сили інерції, які мають велике значення в теорії і практиці обезпилення.

На інерційній сепарації пилу в повітряних потоках ґрунтується обладнання великої групи різноманітних операційних пилоуловлювачів, які одержали найбільш широке використання в практиці обезпилення: сухих інерційних пиловловлювачів, струйних і жалюзійних апаратів та ряду інших.

Раніше класична механіка схилилася до визначення сили інерції як фіктивних сил, що вводяться формально, щоб можна було використати закони Ньютона при розгляді деяких видів руху тіл.

У світі сучасних фізичних подавань слід розрізняти два класи сил інерції:

- Ньютонівські сили інерції діють в інерційних системах відрахування, тобто в нерухомих системах або тих, що рухаються відносно нерухомих систем прямолінійно й рівномірно;

- сили інерції, що діють у неінерційних системах відрахунку, тобто в системах, що рухаються відносно нерухомих систем із прискоренням.

Згідно з першим законом Ньютона – законом інерції – в інерційній системі координат кожне відокремлене тіло, на яке не діють сили з боку інших тіл, може рухатися тільки прямолінійно й рівномірно. Таким чином, можна показати рух пилової частинки у вакуумі, якщо не зважати на силу тяжіння або припустити, що маса частинки настільки мала, що можна на деякий проміжок часу знехтувати впливом цих сил, наприклад, викривлення траєкторії частинок.

Частинка, рухаючись у повітряному середовищі, випробовує її дію. Згідно з другим законом Ньютона, у результаті такої дії в частинці виникає прискорення відносно нерухомої системи координат, і швидкість її руху починає змінюватися. Прискорення частинки пропорційне

дії на неї сили опору середовища і співпадає з напрямком цієї сили.

Якщо абсолютна швидкість прямолінійного руху частинок відносно нерухомої системи координат дорівнює V , а середня швидкість повітряного середовища (потoku) на шляху частинки (без урахування розподілу швидкості навколо частинки) дорівнює w , то ця сила дорівнює [3]:

$$m \frac{dv}{dt} = 3\pi d \mu_n (w - v) \quad (1.11)$$

або

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\tau} (w - v), \quad (1.12)$$

де

$$\tau = \frac{m}{3\pi \mu_n d} = \frac{d^2}{18 \mu_n \rho}, \quad (1.13)$$

τ – час релаксації частинки, с.

Якщо на частинку діють інші сили, то рівняння (1.11) має вигляд:

$$m \frac{dv}{dt} = 3\pi d \mu_n (w - v) + F, \quad (1.14)$$

де F – зовнішня сила, Н.

Користуючись цими рівняннями, можна визначити параметри руху частинки, маючи поточкову швидкість у спокійному середовищі за відсутності будь-яких зовнішніх сил, крім сили аеродинамічного опору середовища, так як $w=0$, то рівняння руху після інтегрування складатиме:

$$x = v_0 \tau \left(1 - l^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (1.15)$$

Відзначимо, що момент часу $t=\tau$ швидкість частинки складає частину початкової швидкості, тому величина τ названа часом релаксації.

Якщо тривалість руху t значно більша τ , величиною l нехтують і вважають, що рух здійснюється з постійною швидкістю.

1.4. Відцентрове осадження частинок пилу

У техніці обезпилювання широко використовується інерційна сепарація, яка проводиться під час тривалого скривлення потоків. Збільшуючи час дії сил інерції, можна досягти сепарації до зовнішніх меж дуже дрібних частинок. Найбільш відомим пиловловлювачем такого виду є циклон.

Рух частинок у криволінійному потоці за відсутності зовнішніх сил описується рівнянням у векторній формі [3]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\tau}(w - v) = -\frac{1}{\tau}v_c, \quad (1.16)$$

де V_c – відносна швидкість руху частинки, м/с, w – швидкість потоку, м/с, v – швидкість руху частинки, м/с.

Якщо розглядати рух частинки в рухомій системі координат, то швидкість частинки дорівнює $V=W+V_c$, її прискорення визначається теоремою Коріоліса, а рівняння має вигляд:

$$m \frac{dV_c}{dt} + m\omega \cdot (\omega \cdot R) + m \left(\frac{d\omega}{dt} R \right) + 2m(\omega \cdot V_c) = -3\pi\mu_n dV_c, \quad (1.17)$$

де ω – кутова швидкість обертання, c^{-1} .

Кожен із членів лівої частини рівняння є складовою сили $m \frac{dv}{dt}$, з якою частинка діє на повітряний потік, що прагне скривити траєкторію частинки й змінити її швидкість. У правій частині рівняння подана аеродинамічна сила. Її дією пояснюється вказаний ефект, тобто зовнішня сила. Перший член рівняння (1.16) пов'язаний із прискоренням сепараційного руху й може

дорівнювати нулю тільки при $V_c = \text{const}$, що, як правило, неможливо. Напрямок цієї сили залежить від початкових умов входу частинки в скривлену частину.

Під час входу потоку на поворот швидкість його окремих шарів змінюється у відповідності до закону площин. У порівнянні з початковою швидкістю, у периферійних шарах вона зменшується, а в центральних збільшується, у точці М (рис.1.1) швидкість потоку дорівнює початковій швидкості. Можна вважати, що перебудова потоків завершується.

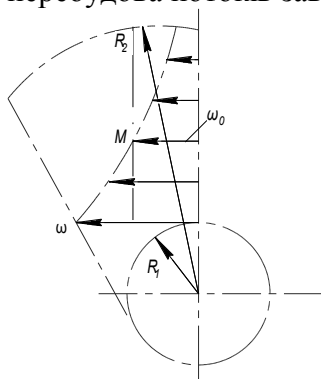


Рис. 1.1. Епюра швидкостей плоскої потенційної течії

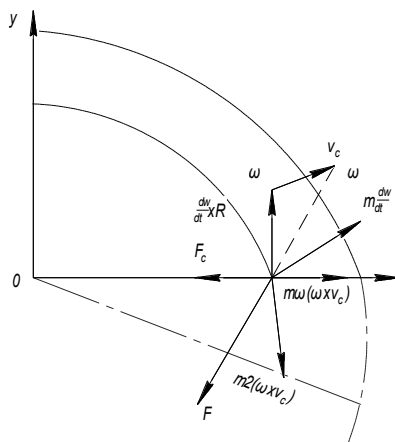


Рис. 1.2. Схема сил взаємодії частинки та середовища в криволінійному потоці

Миттєво, у той час, як швидкість пилових частинок, що дорівнює швидкості потоку ($V_0 = W_0$), змінюється повільно. Внаслідок цього в початковий момент часу $t=0$ можна прийняти $V_c = W_0 - W(R)$ у відповідності до вказаної у правій частині течії, поданий на рис.1.2. V_c і ω_c / dt , спрямовані на периферію течії. Зліва від точки М ця сила направлена всередину течії.

Другий член рівняння є відцентровою силою $m\omega^2 R$, спрямованою за радіусом закруглення потоку. При дослідженні інерційної сепарації, наприклад, у циклонах пиловловлювачів, часто обчислюють тільки цю складову сили інерції і рівняння руху застосовується у формі:

$$m\omega^2 R = 3\pi\mu_n dV_c. \quad (1.18)$$

Таке спрощення в деяких випадках вносить істотну похибку в розрахунки. Вектор, поданий третьою складовою, завжди співпадає за напрямом з коловою швидкістю. Він виражає реакцію частинок, що переходять у середні уповільнені шари, на гальмівний вплив середовища.

Четверта складова є силою Коріоліса. У випадку, що розглядаємо, вона направлена в середину потоку.

Ефективність відцентрового розподілу неоднорідних систем характеризується відношенням відцентрової сили ($m\omega^2 R$) до сили тяжіння (mg), позначається K_p або $K_{ц}$. У системі газ-тверде тіло процес виділення частинок здійснюється в апаратах, що називаються циклонами.

Запилений газовий потік у звичайному циклоні входить через потрубок, розташований тангенційно до циліндричного корпусу пилоосідаючої камери, далі рухається навколо вихідної труби, по спіралі вниз по стінках циліндричного корпусу або циклона і потім угору, у вихідну трубу. Діаметр вихідного по спіралі потоку (ядро вихора) майже дорівнює діаметру вихідної труби, що є результатом обміну кількості руху з поверненими потоками, які виникають на межі застійних зон.

Тверда фаза осаджується під дією відцентрових сил під час обертання газового потоку. На частинку пилу, зважену в обертовому потоці циклону, діють наступні сили:

- 1) відцентрова $F_{ц} = m_1 W_r^2 / r$;

2) сила тяжіння $F_r = m_1 g$;

3) сила опору середовища $F_c = 3\pi d r \mu_c \cdot W_{oc}$;

4) Архімедова сила $F_A = m_2 g$.

Оскільки силою тяжіння та Архімедовою силою під час циклонування газового потоку можна знехтувати, то ефективність розділення системи газ-тверде тіло слід з'ясувати дії відцентрової сили і сили опору F_c . При цьому колову швидкість газового потоку W_2 зручно показати через кутову швидкість

($W_2 = \omega \cdot r$), а швидкість осадження w_{oc} , що дорівнює радіальній швидкості v_r , як похідну шляху руху за часом

$$w_{oc} = \frac{dr}{dt} .$$

1.5. Ефективність осадження частинок під дією різних факторів

У випадку осадження дрібнодисперсних частинок у газі, що має місце при газоочищенні й класифікації, основною характеристикою процесу є швидкість осадження. В усіх випадках, коли тверда частинка й навколишнє середовище рухаються одна відносно іншої, між ними існує зв'язок, що піддається наведеним вище законам опору. У більшості випадків не має значення, що знаходиться в стані руху – частинка чи середовище.

Розглянемо повільне осадження. Нехай частинка масою m рухається в нерухомому середовищі під дією зовнішньої сили. Ця сила може бути силою тяжіння або силою відцентрового поля.

Частинка, що потрапляє під дією сили тяжіння, буде підвищувати свою швидкість доти, поки сила опору середовища не врівноважить силу тяжіння. Потім частинка буде продовжувати рух рівномірно, з постійною швидкістю. Цю постійну швидкість і називають швидкістю

вільного осадження W_{oc} . Отже, при падінні частинок можна назвати три стадії їхнього руху:

- 1) початковий момент;
- 2) рух із підвищенням швидкості;
- 3) рух із постійною швидкістю.

Зростання швидкості від $W=0$ до $W=W_{кін}=W_{oc}$ відбувається протягом короткого проміжку часу. Наприклад, частина пилу діаметром 10 мм з густиною $\rho_{тв}=2700 \text{ кг/м}^3$ досягає постійної швидкості осадження за 0,006 с, тому для технічних розрахунків беруть лише третю стадію руху тіла. Рівняння, що характеризує взаємодію сил, у полі яких знаходиться тверда частина має такий вигляд [11]:

$$\frac{dW}{d\tau} = a - \frac{\rho a}{\rho_{тв}} - \frac{\xi \rho W^2}{2m} f, \quad (1.19)$$

де a – прискорення руху частинки при дії зовнішніх сил, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ – густина середовища, кг/м^3 ; f – площа поперечного перетину частинки, м^2 ;

ξ – коефіцієнт опору.

Якщо на частинку діє сила тяжіння, то $a=g$, а у відцентровому полі $a=g\omega^2$, де ω – кутова швидкість, $1/\text{с}$, а r – радіус обертання частинок, м. Рівняння швидкостей осадження в залежності від діючих сил і режиму течії наведені вище.

При стисненому осіданні коефіцієнт опору ξ у рівнянні (1.19) буде більшим, ніж при осадженні одинокої частинки, за рахунок удару твердих частинок одна об одну. При достатньо великій об'ємній концентрації твердої фази товщина пограничного шару становить більше відстані між окремими частинками. Верхньою межею об'ємної концентрації $C_{тв} = 2\div 5 \%$. При більших значеннях $C_{тв}$ відбувається взаємодія між частинками і швидкість осідання вже не може розраховуватися по закону Стокса. У процесі осадження твердої фази в газовій (або рідинній)

фазі остання рухається в напрямку, зворотному руху частинок, за рахунок її витіснення утворюється осадок. Це явище призводить також до зниження середньої швидкості осадження у стиснених дисках.

Відносна швидкість руху при стисненому осадженні дорівнює [11]:

$$W_{\text{відн}} = W_{\text{мс}} - W = \frac{W'_{\text{мс}}}{\varphi} - \frac{W'}{1 - \varphi}, \quad (1.20)$$

де $W_{\text{ТВ}}$ і W' – швидкості твердої та рідинної фаз, віднесені до перетину всього апарата, м/с; φ – завантаженість твердою фазою (у двофазних системах φ дорівнює об'ємній долі дисперсної фази); W – швидкість середовища, в якому осаджується частинки, м/с; $W_{\text{ТВ}}$ – швидкість руху твердих частинок, м/с; Z – координата вісьова, яка направлена протилежно до дії сили тяжіння; g – прискорення вільного падіння, м²/с; p – тиск, Па; t – час, с.

Під час розрахунків швидкості стисненого осадження зручно використовувати рівняння Стокса (2) із введенням поправного множника R , що обчислюють за залежністю $R = \frac{\mu}{\mu_e} \varepsilon$, ε – порізність шару. У [11] дається

залежність R від ε і $\frac{\mu}{\mu_e}$; μ_e – ефективна в'язкість суспензії.

Якщо газова суміш складається із частинок різної форми, то взаємодія між газами (рідиною) і твердою фазами є дуже складною, оскільки швидкість осідання безперервно змінюється за висотою шару, в якому осідають тверді частинки.

В загальному випадку швидкість гравітаційного осідання можна визначити, якщо ввести корективи до формули Стокса, у наступній залежності [11]:

$$W_{oc} - v = \frac{dr^2 SH}{\eta \mu_0 C_i (1 - K_i)}, \quad (1.21)$$

де W – швидкість газу або рідини біля частинок, м/с; C_i – середня об’ємна концентрація твердої фази в суспензії, %; K_i – ефективна концентрація, %;

S – сила взаємодії газової і твердої фази, Н; H – фактор взаємодії.

Розглянуті закони опору руху частинками застосовуються, в основному, до шароподібних або сферичних частинок. Опір рухомих частинок, формула яких відрізняється від шару, додатково залежить від фактора форми ψ – коефіцієнта сферичності.

Фактор ψ для частинок неправильної форми знаходиться як відношення поверхні кулі $s_{ш}$, що має такий же об’єм, як і реальна частинка, до поверхні частинки S [11,12]:

$$\psi = \frac{S_m}{S} = 4,878V^{2/3} / S. \quad (1.22)$$

Поверхня шару з об’ємом, рівним об’єму частинки, обчислюється за еквівалентним діаметром $d_e = \sqrt[3]{6W_2} / \pi$,

звідки $s_{ш} = \pi \left(\frac{w_2}{\pi} \right)^{2/3}$.

Коефіцієнти опору для несферичних частинок можна обчислити за залежністю $\xi = \frac{A}{Re}$, де $A=f(\psi)$.

Для ламінарного обтікання несферичних частинок може бути використане емпіричне рівняння:

$$A = \frac{24}{0,8431g\left(\frac{\psi}{0,065}\right)}. \quad (1.23)$$

Для турбулентного обтікання коефіцієнт опору не залежить від числа Re , а тільки від фактора форми:

$$\xi = 5,31 - 4,88\psi . \quad (1.24)$$

Значення факторів форми для різних тіл наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Значення фактора форми для деяких геометричних тіл

| Форма частинок | ψ | Форма частинок | ψ |
|------------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Шар | 1.000 | Диск ($h = r/3$) | 0.594 |
| Куб | 0.306 | Диск ($h = r/10$) | 0.323 |
| Призма ($a \times a \times 2a$) | 0.762 | Диск ($h = r/15$) | 0.220 |
| Призма ($a \times 2a \times 2a$) | 0.761 | Циліндр ($h = 3r$) | 0.860 |
| Призма ($a \times 2a \times 3a$) | 0.725 | Циліндр ($h = 10r$) | 0.691 |
| Диск ($h = r$) | 0.827 | Циліндр ($h = 20r$) | 0.580 |

де a – довжина, м, r – радіус, м, h – висота, м.

При обчисленні швидкості осідання частинок і коефіцієнтів опору зазвичай припускають, що в системах газоочисних установах має місце ламінарний режим течії, але на практиці він часто буває турбулентним. Для такого режиму потрібно знати величину критерія Рейнольдса (Re), до якого входить швидкість осадження (W_{oc}). У зв'язку з цим розрахунок W_{oc} можливий тільки за допомогою методу послідовних наближень: спочатку задається ламінарний режим осідання, а потім перевіряється, чи лежить Re_{oc} у межах, що відповідають прийнятним умовам. При неспівпаданні результатів переходять до другого ступеня розрахунків для одержання задовільного співпадіння даних, однак такої важкої процедури можна запобігти, використовуючи метод

Ляшенка [11]. Для цього потрібно знати величину критерію Архімеда, який розраховують за діаметром частинки. Потім знаходять критерій Рейнольдса. Таким чином, встановлюють граничні значення критерію Архімеда, відповідного переходу однієї межі осідання в іншу. У межах ламінарного режиму осідання ($Re < 2$), тобто при дії закону Стокса $\xi = \frac{24}{Re}$, одержимо $Re = \frac{Ar}{18}$.

Критичне значення критерію Архімеда $Ar_{кр1} = 36$, отже існування ламінарного режиму осідання обмежується умовою $Ar \leq 36$. В умовах автономного обтікання ($\xi = 0,44$) отримано рівняння $Re = 1,74\sqrt{Ar}$.

У перехідній межі суміжне значення критерію $Ar = 500$ і рівняння має вигляд: $Re = 152Ar^{0,715}$.

Отже, межа осідання в перехідному режимі обмежується зміною критерію Архімеда в межах $36 < Ar < 8,3 \cdot 10^4$. Інтерполяційна залежність Годеса [8] пов'язує критерії Ar і Re для приблизних розрахунків швидкості частинки:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}. \quad (1.25)$$

1.6. Коагуляція частинок у зваженому шарі

Більшість аерозолів нестійкі, тобто з часом змінюється число та вага частинок в одиниці об'єму газу. Пояснюється це наступними обставинами. Великі частинки під впливом сил тяжіння випадають із газу на дно апаратів і газоходів, в яких вони знаходяться. Під час руху газу, запиленого великими частинками, вони під дією інерційних і відцентрових сил виносяться із газу. Найдрібніші частинки рухаються не тільки в результаті поступового руху потоку, а й під дією броунівського руху, тобто ударів молекул вихрового газового потоку. При цих взаємодіях частинки будуть рухатися не паралельно одна

до одної. Вони будуть стикатися між собою і зі стінками апарату. При стиканні зі стінками частинки прилипають до них, а при стиканні між собою злипаються.

Тверді частинки аерозолів при стиканні утворюють пухкі грудочки. Подальше стикання призводить до великих грудочок-конгломератів. Такий процес називається коагулюванням. На швидкість коагулювання впливають різні фактори, а саме: розрахункова концентрація аерозолу, $1/\text{м}^3$, розмір частинок, температура та в'язкість газового середовища, електризація частинок, звукові коливання газового середовища, утворення вихорів, їх турбулентність тощо. За відсутності або незначному впливі електронних, магнітних та звукових дій слід розглянути два види коагуляції – броунівську і турбулентну.

Броунівську коагуляцію часто називають тепловою. Швидкість коагуляції аерозолевих частинок підкоряється наступному закону [5, с. 261]:

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = K\tau, \quad (1.26)$$

де n – концентрація частинок у деякий момент часу, %; n_0 – початкова концентрація частинок у потоці, %; K – константа коагуляції, $\text{м}^3/\text{с}$.

Швидкість зменшення порахованої концентрації частинок у результаті процесу коагуляції може бути визначена з рівняння [1]:

$$N = -dn/d\tau = -Kn^2, \quad (1.27)$$

де N – швидкість коагуляції – величина, що відповідає числу частинок, які зустрічаються в одиниці об'єму за певний проміжок часу, $1/(\text{м}^3 \text{ с})$. Згідно з рівнянням (1.27) спочатку, коли порахована концентрація частинок велика, коагуляція протікає з більшою швидкістю, але потім швидкість її падає. Теплова або броунівська коагуляція характеризується константою $K_{\text{бр}}(\text{м}^3/\text{с})$ і може бути порахована за формулою [13]:

$$K_{\text{бр}} = \frac{4 \cdot K_{\text{б}} \cdot T_{\text{г}}}{3 \cdot \mu_{\text{г}}}, \quad (1.28)$$

де $T_{\text{г}}$ – температура газу, °C; $\mu_{\text{г}}$ – в'язкість газу, Н·с/м²; $K_{\text{б}}$ – константа Больцмана $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

У випадку, якщо середня довжина перебігу газових молекул однакова з розмірами частинок, у вираз (1.28) вводиться поправка Кіннігена-Мілікена:

$$K_{\text{бр}} = \frac{4K_{\text{б}} \cdot T_{\text{г}}}{3\mu_{\text{г}}} C_{\text{к}}, \quad (1.29)$$

де $C_{\text{к}}$ – поправка Кілігета-Мілікена $0,014 \div 1,0$; $d=0,002-0,2$ м.

При порівнянні експериментальних констант теплової коагуляції [1, с. 54] було встановлено, що процес коагуляції мало залежить від природи аерозолі. Згідно з експериментами і теоретичним даними полідисперсні аерозолі коагулюють швидше монодисперсних. Особливо швидко відбувається поглинання дрібних частинок більшими, отже швидкість коагуляції зростає за рахунок полідисперсності.

Швидкість броунівської коагуляції може бути розрахована в залежності [14]:

$$N_{\text{бр}} = 8\pi D_{\text{г}}(n_0)^2 dr, \quad (1.30)$$

де $D_{\text{г}}$ – коефіцієнт дифузії.

З рівняння (1.30) видно, що швидкість теплової коагуляції росте з підвищенням температури газів $T_{\text{г}}$. Але в'язкість газів впливає на величину $D_{\text{г}}$, що також збільшується з підвищенням температури, тому $N_{\text{бр}}$ буде зростати не прямопропорційно $T_{\text{г}}$. Швидкість коагуляції малих частинок зростає також із посиленням тиску через підвищення $C_{\text{к}}$ (поправка Кіннігена-Мілікена).

Турбулентна коагуляція зважених частинок. При турбулентному русі газового потоку вирішальну роль стиснення частинок відіграють турбулентні пульсації. Згідно з [15, с. 219-226] у турбулентному потоці можливі два механізми коагуляції. Перший реалізується при повному захваті частинок аерозолі турбулентними пульсаціями. Цей механізм має переважне розповсюдження при густині частинок, маловідмінній від густини потоку. У випадку аерозольних частинок, густина яких приблизно в 10^3 разів більша густини газів повного захвату частинок, цей механізм має другорядне значення. Найбільший коагуляційний ефект у турбулентному газопиловому потоці здійснюється завдяки другому механізму, що отримав назву механізму прискорення.

Коагуляція за рахунок механізму прискорення здійснюється за рахунок різниці в густині газового потоку та частинок аерозолі. Швидкість отриманих частинок залежить від їх маси й має суттєву різницю в полідисперсних системах. Через різницю у швидкості частинки зустрічаються одна з одною, що супроводжується коагуляцією.

Швидкість турбулентної коагуляції може бути виражена у вигляді формули:

$$N_T = 1,3 \sqrt{\frac{\varepsilon_T}{\nu_\Gamma}} \cdot dr^3 \cdot (n_0)^2, \quad (1.31)$$

де $\varepsilon_T = \frac{\varepsilon_n}{\rho_2}$ – константа, що виражає витрати енергії.

Швидкість турбулентної коагуляції другого механізму (механізму прискорення) визначається в залежності [15, с. 224]:

$$N_{\text{прис}} = \pi \cdot \frac{\rho_r}{\rho_e} \cdot (n_0)^2 \cdot \frac{\varepsilon_t^{3/4}}{\nu_\Gamma^{5/4}} \cdot \beta \cdot d_2^4, \quad (1.32)$$

де β – коефіцієнт, що характеризує розподіл частинок за розмірами;

dr – середній розмір частинок; ν_2 – в'язкість газу, Н·с/м².

За рівних умов швидкість коагуляції, в основному, за рахунок механізму прискорення, визначається швидкістю газового потоку $N_{\text{приск}} = V_2^{3/4}$.

Отже, другий механізм при турбулентній коагуляції частинок до $dr = 10^{-7}$ м, коли коагуляція протікає, в основному, за рахунок броунівської дифузії. Для частинок, що більші, ніж 10^{-6} м $N_{\text{приск}}$ у декілька разів переважає N_t .

Градiєнтна коагуляція. За наявності поперечного градiєнта швидкостi газiв у потоцi вiдбувається градiєнтна коагуляція. Наприклад, пiд час протiкання газу бiля твердої стiнки. Частинка, яка знаходиться бiля стiнки, рухається з меншою швидкiстю, нiж частинка, розташована далi вiд неї. Якщо вiдстань мiж ними менша за їх розмiри, то частинки повиннi зустрiтися.

Швидкiсть градiєнтної коагуляції $N_{\text{гр}}(1/\text{см}^3 \cdot \text{с})$ може бути визначена в залежностi [7]:

$$N_{\text{гр}} = 10,67(n_0)^2 \cdot \Gamma dr^3, \quad (1.33)$$

де Γ – градiєнт швидкостi, 1/с.

Градiєнтна коагуляція iнтенсивна в постiйному шарi при турбулентному русi газового потоку. Вона, в основному, обмежена тонким пристiнним шаром i зумовлює iстотний вплив при русi потоку по довгих трубах або при розвинутiй поверхнi контакту.

Кiнематична коагуляція зважених частинок. Процес кiнематичної коагуляції протiкає при вiдносному русi частинок рiзних розмiрiв та виникає в результатi дiї зовнiшнiх сил i рiзних швидкостей. Найбiльш поширений приклад кiнематичної коагуляції – осiдання на краплинах, що падають пiд дiєю сили тяжiння – гравiтацiйна коагуляція.

На кiнематичнiй коагуляції оснований осадження частинок розпилених водою в мокрих пиловловлювачах.

ЧАСТИНА 2
ТЕХНОЛОГІЇ ТА АПАРАТУРНЕ ОФОРМЛЕННЯ
ПРОЦЕСІВ ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ
РОЗДІЛ 2
СУХІ МЕХАНІЧНІ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ

2.1. Пилоосаджувальні камери

У пилоосаджувальних камерах виділення зважених частинок із газового середовища відбувається головним чином під дією сили тяжіння.

Розміри пилоосаджувальних камер (рис. 2.1) [7] визначають відносно до заданих витрат газу та мінімального діаметру частинок пилу, що разом із більшими частинками повинні випасти з потоку.

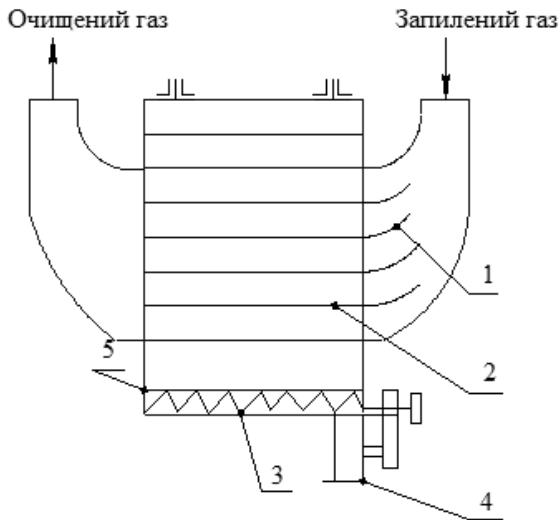


Рис. 2.1. Пилоосаджувальна камера: 1– направляючі лопатки; 2– палки; 3 – шнек; 4 – пиловий затвір; 5 – бункер

Співвідношення довжини l і висоти між полками h знаходять із співвідношення швидкості газу V_2 і седиментаційної швидкості V_0 :

$$V_0/V_2=h/e, \quad (2.1)$$

Ширину камери визначають із прийнятих в обчисленнях швидкості газу V_2 , висоти камери H та заданих витрат L :

$$b = \frac{L}{H \cdot V_2}, \quad (2.2)$$

Для розрахунку швидкості осадження (зважування) V_0 по заданому діаметру частинки b приведено вище в залежності (8, 10). Швидкість гравітаційного осадження в повітрі можна також визначити за допомогою графіків, зображених на рис. 2.2.

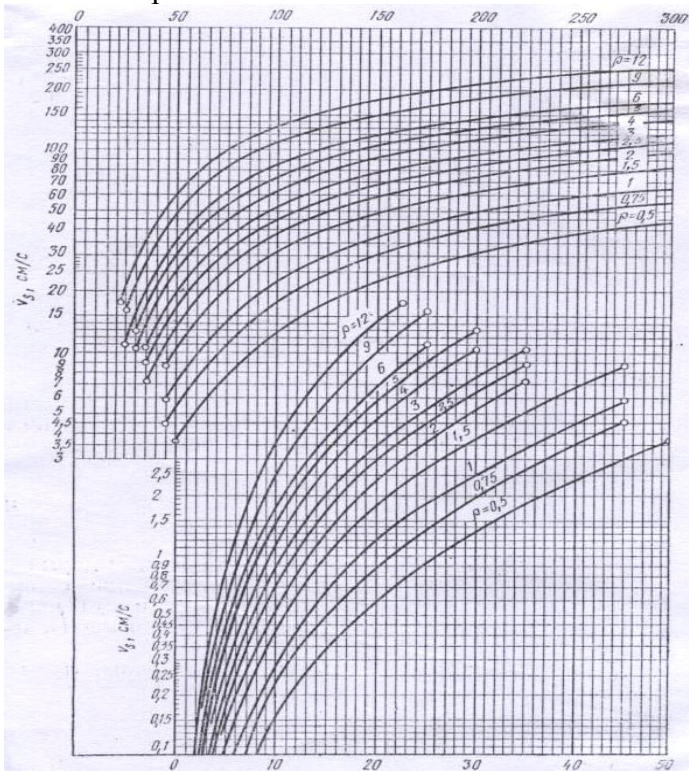


Рис. 2.2. Графіки швидкості гравітаційного осадження

За умови дії закону Стокса, мінімальний розмір частинок d_{\min} (м), що будуть повністю осаджені в камері, можна визначити за допомогою залежності [9]:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{18Q_2 \cdot \mu_2}{(\rho_v - \rho_g)gBK}}, \quad (2.3)$$

де Q – витрати газу, $\text{м}^3/\text{с}$; μ_2 – в'язкість газу, $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; ρ_v , ρ_g – густина частинки і густина газу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При проектуванні осаджувальних камер необхідно віднайти можливість вторинного внесення. Необхідно, щоб швидкість газового потоку була не вищою за 2 м/с, а для деякого пилу ця величина дуже велика.

2.2. Інерційні пиловловлювачі

Ефективність обезпилення в простій пилоосідаючій камері може бути підвищеною, а габарити зменшені, якщо частинкам надати допоміжний момент руху вниз за напрямком гравітаційного осідання. Існує велика кількість конструкторських розробок, заснованих на цьому принципі, починаючи з установки в камері простих відстійних решіток до спеціальних форсунок, що прискорюють процес осідання.

Прості інерційні пиловловлювачі (рис. 2.3 а, б, в) [9] іноді розміщуються послідовно. Хоча їх ефективність така ж, що і в простих пиловловлювачах та пилоосідаючих камерах, а перепад тиску дещо більший, однак він може бути знижений при використанні закруглених відстійників (рис. 2.3 г.).

В інших пилоосідаючих камерах використовується направлена вниз труба, що надає частинкам додаткове прискорення.

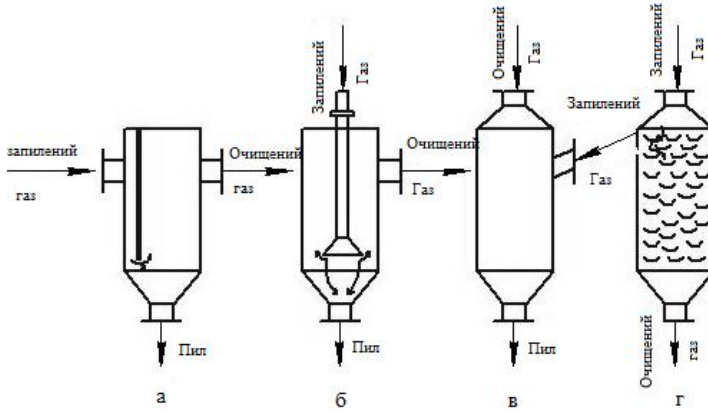


Рис. 2.3. Інерційні пиловловлювачі:
 а – з вертикальною перегородкою; б – із
 центральною трубою; в – з боковим штуцером; г – з
 горизонтальними елементами

Інерційний принцип використовується в жалюзійних пиловловлювачах, в яких використовується різка зміна напрямку вузького струму газового потоку, що проходить через зазори між лопатями жалюзей і відбиває з поверхні лопатей пил у напрямку до отвору, через який виходять частини газового потоку, збагаченого пилом.

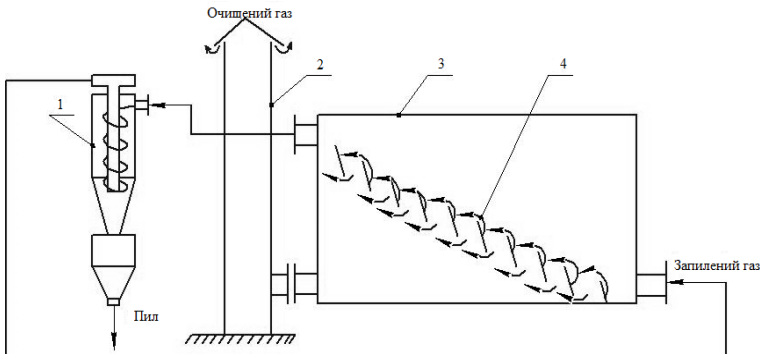


Рис. 2.4. Жалюзійний інерційний вловлювач:
 1 – циклон; 2 – труба; 3 – камерний жалюзійний
 пиловловлювач; 4 – жалюзі пластичні

У жалюзійному колекторі (рис. 2.4) використано наступний принцип: при різній зміні напрямку руху газового потоку кругові частинки будуть зберігати початковий напрям прямолінійного руху. Такий колектор відрізняється низьким перепадом тиску. Він іноді використовується в якості попереднього пиловловлювача і встановлюється перед циклонами або руховими фільтрами. Приблизно 80% частково очищеного газового потоку пропускається через жалюзі, інша частина запиленого газу подається в циклон. Приклади інших пиловловлювачів із жалюзійними витяжними щілинами подано на рис. 2.5 а, б. У цих пиловловлювачах нижчий опір, але нижча й ефективність.

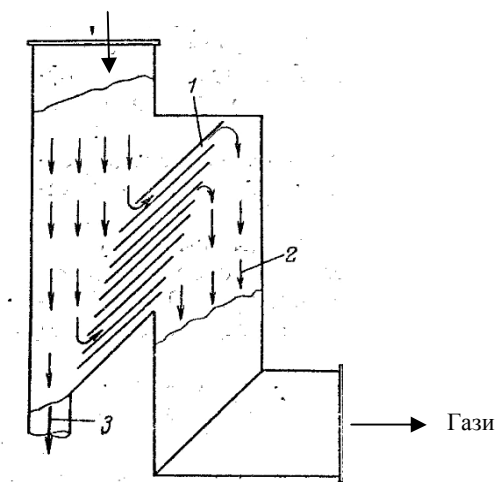


Рис. 2.5 а. Жалюзійний пиловловлювач із частковим відводом запиленого газового потоку: 1 – жалюзєва решітка; 2 – очищені газу; 3 – запилені газу

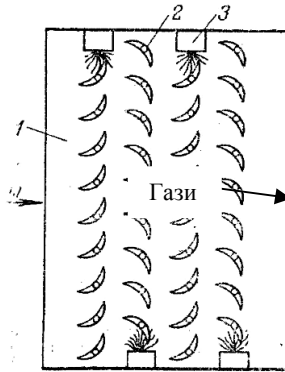


Рис. 2.5 б. Інерційний пиловловлювач із відображуючими стрижнями: 1 – корпус; 2 – стрижні; 3 – пристрій для підводу зрошення

2.3. Відцентрові пиловловлювачі

Циклони почали використовуватися в промисловості з 80-х років XIX сторіччя. Через простоту конструкції, малі габарити та надійність у роботі, вони найбільш поширені і використовуються до цього часу.

Принцип дії циклону заснований на виділенні частинок пилу із газового потоку під дією відцентрових сил, що виникають унаслідок обертання потоку в корпусі апарату.

Повітря входить до циклону через тангенційний патрубок 2 (рис. 2.6) і, отримавши обертальний рух, опускається гвинтоподібно вздовж внутрішніх стінок циліндричного корпусу 3 й конічної частини 4. У центральній зоні обертання повітряний потік, звільнений від пилу, рухається в напрямку знизу вгору й виноситься із циклона через центральний глушник 7, улітку 1. Невелика частина потоку, в якому сконцентрована більша частина виділеного пилу, надходить через пиловивідний отвір у бункер 5, де відбувається остаточне осідання частинок. Ця частина потоку, звільнившись від сконцентрованих у

ньому частинок, виходить із бункера через центральну зону 4. Уловлений пил вивантажується з бункера 5 через пилевипускний патрубок та розвантажувальний прилад 6, що у період роботи циклона повинен забезпечити повну герметичність.

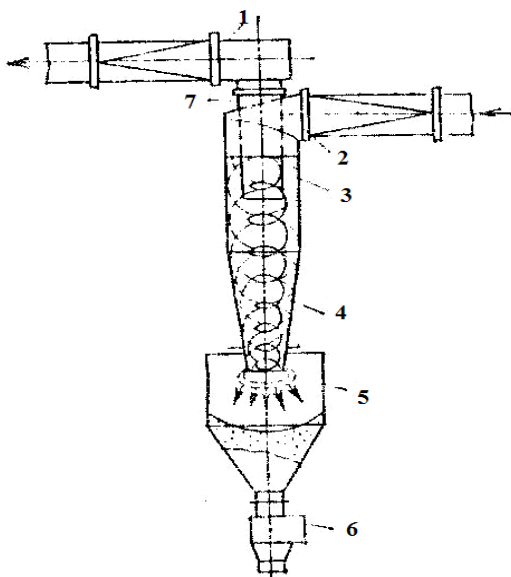


Рис. 2.6. Схема циклона: 1 – розгвинчувальний апарат для викиду очищеного повітря; 2 – вхідний патрубок; 3 – циліндрична частина циклона; 4 – конічна частина циклона; 5 – пилоосідаючий бункер; 6 – пиловий затвор; 7 – вихідна труба

Через інтенсивне обертання газу в корпусі циклона статичний тиск знижується від його периферії до центру. Те ж саме відбувається і в пилозбірному бункері. Отже, герметичність бункера повинна повністю забезпечуватися не тільки під час установлення циклона на всмоктувальній лінії, а й на нагнітальній лінії вентилятора. Недотримання

цієї умови призведе до різкого зниження виділення пилу в циклоні. Після проходження вхідного завихрювання газу, що обертається й опускається вниз де продовжується обертовий рух. У нижній частині обертовий потік змінює напрям на протилежний – він направляється вгору, у напрямку вихідної труби. Бункер є важливою складовою пиловловлювача. Порушення обертового руху в бункері неминуче призведе до помітного зниження ступеня очищення газу. Тому ступінь очищення газу в групових циклонах з одним загальним бункером дещо нижча, ніж в одиночному апараті. Установлення циклонів без бункерів, з приєднанням, наприклад, безпосередньо до пилорозвантажувального пристрою, завжди призводить до погіршення ступеня очищення.

У вітчизняній пилоочисній техніці використовуються різні типи циклонів, тому що розробкою конструкцій протягом десятиріч займалося багато організацій, що не координували свою роботу.

До кінця ХХ сторіччя знаходили використання одинарні іліндроскопічні ЛІОТ, що були розроблені ще в 1934 р. У післявоєнний період велике розповсюдження отримали конічні циклони СІОТ (рис. 2.7) та циклони НДІОГАЗ ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У і ЦН-24.

Цифри 11, 15, 24 відповідають нахилу гвинтового підводу газу у верхній частині апарату. Індекс У означає вкорочений. Висота і площа вхідних отворів у циклонах ЦН-15 та ЦН- 24 більша, ніж у ЦН-11, у 2,3 рази, а швидкість входу газу відповідно менша. Тому при рівних діаметрах корпусу й однакових витратах тиску пропускна можливість у циклонів ЦН-15 і ЦН-24 більша, ніж у ЦН-11. Відповідно ефективність цих циклонів, а особливо ЦН-24, нижча, ніж у ЦН-11.

Відносні розміри циклонів типу ЦН наведені в таблиці 2.1 та на рис. 2.8.

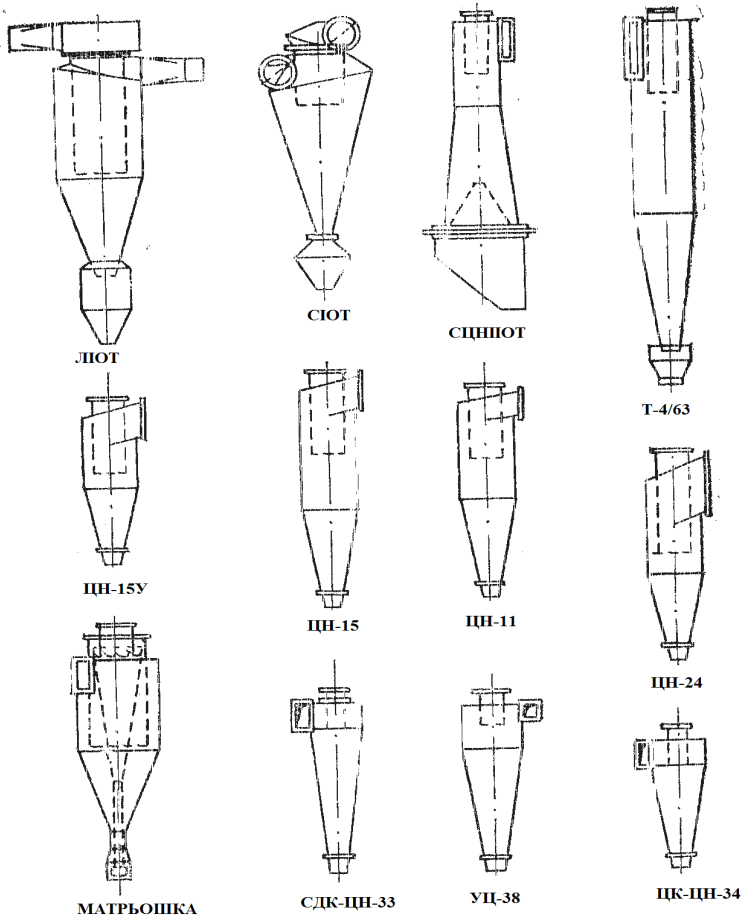


Рис. 2.7. Типи зворотньопоточних циклонів

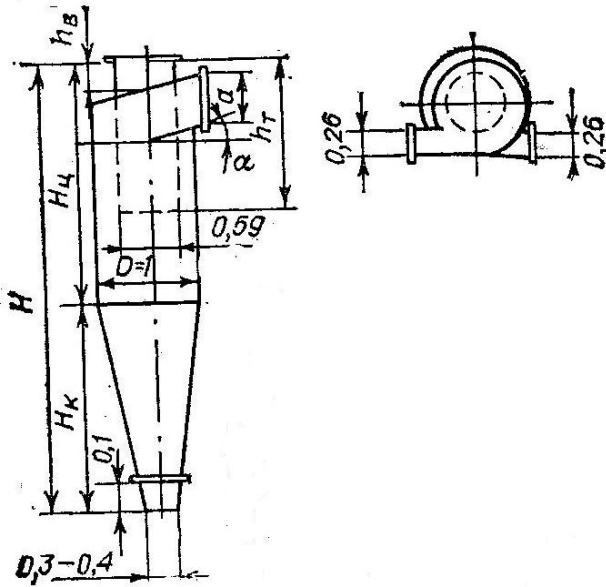


Рис. 2.8. Технічні характеристики циклонів ЦН

Таблиця 2.1
Відносні розміри циклонів типу ЦН у долях
діаметра корпусу Д

| Тип апарату | град | Q | ht | Hц | Hк | hв | H |
|-------------|------|------|------|------|------|-----|------|
| ЦН-24 | 24 | 1,11 | 2,11 | 2,11 | 1,75 | 0,4 | 4,26 |
| ЦН-15У | 15 | 0,66 | 1,50 | 1,51 | 1,50 | 0,3 | 3,31 |
| ЦН-15 | 15 | 0,66 | 1,74 | 2,26 | 2,00 | 0,3 | 4,56 |
| ЦН-11 | 11 | 0,48 | 1,56 | 2,06 | 2,00 | 0,3 | 3,38 |

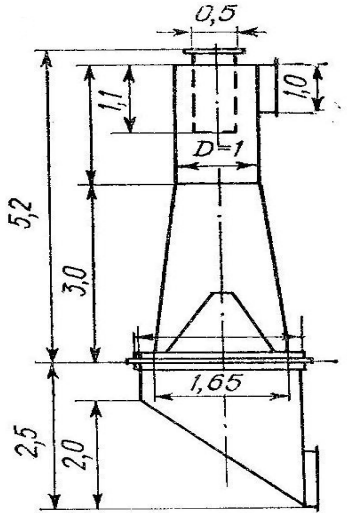


Рис. 2.9. Циклони конічні НДОГАЗ та ВЦНІОТ:
а – циклон СК, б – циклон ВЦНІОТП

Наприкінці 60-х років у СРСР почали впроваджувати високоефективні спірально-конічні (СК) та спірально-довгоконічні (СДК) циклони НДОГАЗ із підвищеними гідравлічними опорами: СК-ЦН-34 та СДК-ЦН-33. Цифри 33 і 34 визначають процентне відношення діаметрів вхідної труби і корпусу (рис. 2.9 а).

Для пиловловлення використовуються також циклони з розширюючим корпусом конструкції ВЦНІОГ (Санкт-Петербург) (рис. 2.9 б). На відміну від інших циклонів, у них відсутній підсос у бункері. У цьому їх перевага. Відносні розміри циклонів СК та ВЦНІОП наведені на рис. 2.9 а, б.

Таблиця 2.2

**Відносні розміри спірально-конічних циклонів
СК і циклонів ВЦНІОТ**

| Тип апарату | H_1 | H_2 | h_1 | h_2 | D_2 | D_1 | d | a | b | H_3 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|-----|-----|-----|-------|
| СКД-ЦН-33 | 1,2 | 2,2 | 0,5 | 0,2 | - | - | 0,3 | 0,5 | 0,2 | - |
| СК-ЦН-34 | 0,51 | 2,1 | 0,5 | 0,5 | - | - | 0,3 | 0,2 | 0,2 | - |
| ВЦНДІ ОП | 2,0 | 3,0 | 1,1 | 2,0 | 1,6 | 1,2: 1,4 | 0,5 | 1,0 | - | 2,5 |

Російськими вченими були проведені експериментальні дослідження ступеня очищення в багатьох конструкціях циклонів залежно від величини гідравлічних витрат, що призвели до однакових витрат повітря. Найбільш ефективним виявився чехословацький циклон Т-4/630, але він настільки великий, що не був рекомендований для широкого використання. Його висота більша, ніж у ЦН-11 у 1,57 разів, а металоємність вища в 1,86 разів.

На основі досліджень в уніфікований ряд пилоуловлювачів було включено циклон ЦН-11 як найбільш ефективний за габаритами та зручний для комплектування в групи. Наступні три циклони: ЦН-15, СІОТ, ВЦНІОТ – за ступенем очищення рівноцінні. Хоча вони дещо поступаються в цьому відношенні ЦН-11, іноді їх можна рекомендувати до використання. ЦН-15 має діаметр на 10% менший, ніж ЦН-11, а також зручний для комплектування в групи. Деякі переваги, пов'язані з особливою формою його конічної частини, має циклон ВЦНІОТ.

Зі збільшенням діаметру циклону при постійній тангенційній швидкості потоку відцентрова сила, що діє на пилові частинки, знижує ефективність пиловловлення. Крім того, встановлення одного високопродуктивного

циклона викликає ускладнення при його розміщенні внаслідок великої висоти. У зв'язку з цим у техніці пиловловлення широкое використання знайшли групові й батарейні циклони (рис. 2.10).

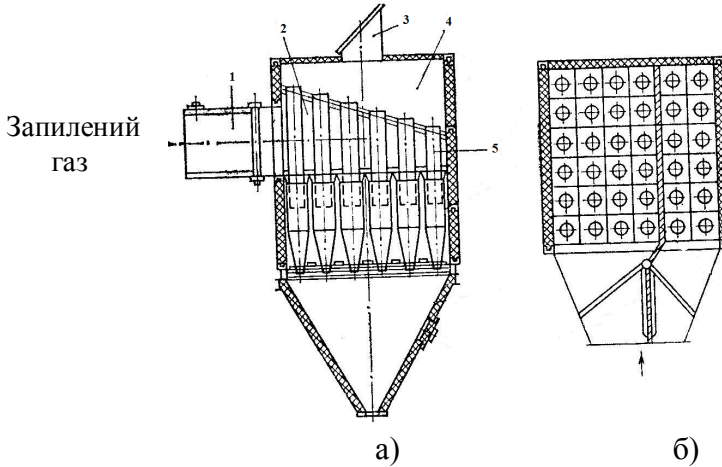


Рис. 2.10. Батарейний циклон: 1 – корпус; 2 – камера; 3 – решітка; 4 – циклонний елемент; 5 – бункер

Батарейні циклони, що називаються також мультициклонами, складаються з декількох десятків або сотень паралельно включених циклончиків. У вітчизняних конструкціях в одному апараті нараховується до 792 елементів при витратах газу до $650000 \text{ м}^3/\text{годину}$. Схему батарейного циклону зображено на рисунку 2.10. Забруднений газ поступає в газорозподільну камеру 2 і розподіляється за циклонними елементами, встановленими в корпусі 1 та лопаті 6 для закручення потоку газу, внаслідок чого пил відкидається до стінок і рухається вниз по спіралі. Пил збирається в кінчному бункері, а очищений газ виходить через трубки в загальний вивідний патрубок.

2.4. Вихрові пиловловлювачі

Вихрові пиловловлювачі з'явилися порівняно недавно [16], проте вони встигли отримати значне розповсюдження в промисловості.

Основною відмінністю вихрових пиловловлювачів від циклонів є наявність допоміжного пристрою газового потоку. У країнах СНД розробки ведуться, в основному, щодо створення конструкцій вихрових пиловловлювачів у напрямку протиточного (зустрічного) руху газових потоків. На відміну від них перші вихрові пиловловлювачі, що були запатентовані в Німеччині в 1954 році, мали прямоточну дію. Основний потік газу рухається знизу вгору, а вторинний потік зверху у вигляді струменів. Вторинний поступово входить в основний (первинний), і далі вони сумісно рухаються в корпусі й виходять у глушник 15.

У результаті багаточисельних дослідів Московського текстильного інституту такий апарат був розроблений у різних варіантах і конструктивних особливостях, проходив випробування в НДІОгазі й був рекомендований для широкого впровадження в промисловість. За ним закріпилася назва апарат із зустрічними закрученими потоками (АЗЗП) [17].

Схема дії апарату із зустрічними закрученими потоками показана на рис. 2.11. Запилений газ подається по двох каналах. Більша частина вводиться через тангенціальний патрубок 2 у верхню частину корпусу 1. Менша частина забрудненого газу або повітря надходить через нижній осьовий завихровувач 3.

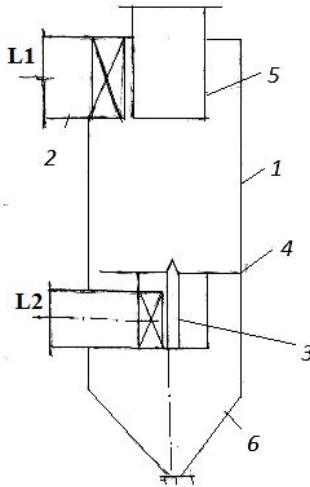


Рис. 2.11. Вихровий пиловловлювач типу АЗЗП

Обидва потоки рухаються назустріч один одному. Верхній потік у закрученому стані рухається вниз до відбійної шайби 4. Нижній потік рухається в привісній зоні, також у закрученому стані, до вихідного патрубку 5. Частина периферійного потоку рухається до відбійної шайби, де здійснюється його поворот, причому тверді частинки рухаються між стінкою корпуса 1 та шайбою в конічний бункер, а далі висипається спеціальними приладами в тару. Друга частина периферійного потоку поступово входить у первинний протягом висоти зони сепарації (h).

Роздвоєння потоку запиленого газу на дві частини значно підвищує інтенсивність обертового руху й ефективність пиловловлення. При цьому в центральній частині ліквідується зона пониженого тиску, що в циклоні негативно впливає на відділення частинок пилу від газів. Проникливість газу в АЗЗП більша, хоча діаметр апаратів з розділення потоків на дві частини однаковий.

2.5. Динамічні пиловловлювачі

У динамічних пиловловлювачах очистка газу від пилу утворюється за рахунок відцентрових сил та сил Коріоліса, що виникають під час обертання робочого колеса (рис. 2.12). Якщо колесо почало обертатися з коловою швидкістю $U = \omega_k R_k$, де ω_k – кутова швидкість обертання робочого колеса, s^{-1} ;

R_k – відстань від центру обертання колеса до довільної крапки в площині обертання, м. Очевидно, що частинка, яка розглядається, буде обертатися зі швидкістю, що трохи відрізняється від U . Приймаємо для спрощення, що ці швидкості рівні. За цієї умови сила інерції частинки зростає на рівнодіючу відцентрової та Коріолісової сил, що пов'язані з обертанням колеса.

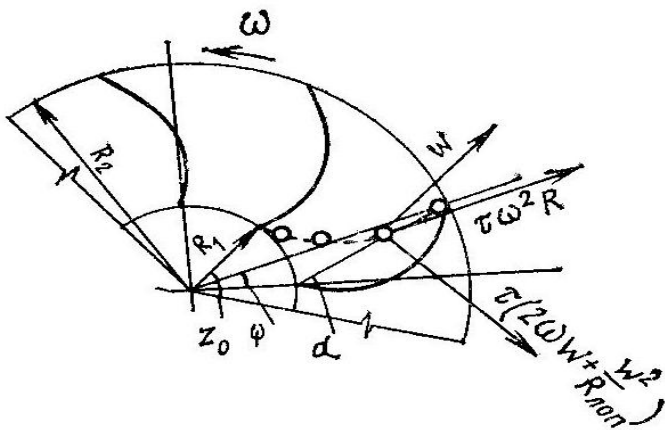


Рис 2.12. Схема руху пилової частинки в міжлопатевому просторі робочого колеса

Зберігаючи для зміненої швидкості потоку позначення W , погоджуємося, що швидкість V досягається частинкою миттєво і зберігається постійною весь недовгий

час її руху. Виключимо також член рівняння, що відображає вплив Коріолісової сили, пов'язаної з рухом частинки відносно лопатей колеса, що значно менше ніж член, який відображає обертання колеса. Тоді відносний рух частинки в міжлопатевому каналі визначається рівнянням:

$$\omega \cdot (\omega \cdot R) + \omega_k \cdot (\omega_k \cdot R_k) + 2(\omega_k + \omega) + \frac{1}{\tau} V_c = 0. \quad (2.4)$$

Якщо позначати абсолютну швидкість повітряного потоку в каналі через $c=w+u$, швидкість частинок за тих же умов через її більшу густину буде дорівнювати $c_a=w+u+v_c$. У системі координат, що обертається разом з колесом, відносна швидкість частинки приблизно дорівнює $v=w+v_c$.

У зв'язку зі складністю розв'язання рівняння руху (2.4) інженерні методи розрахунку динамічних пиловловлювачів ще не розроблені, але першу спробу їх розв'язання зробив О.І. Пірумов. Крім цього, мають місце лише результати досліджень деяких конструкцій пиловловлювачів [18]. Згідно з дослідженнями динамічні пиловловлювачі забезпечують достатньо високу ефективність при уловленні частинок пилу, більших за 10 мкм.

Залежно від місця підводу запиленого потоку динамічні пиловловлювачі можна розділити на декілька груп:

- пиловловлювачі, в яких запилений потік поступає в центральну частину колеса (рис. 2.13);
- в апаратах типу (ЦРП) вловлені частинки переміщуються в протилежному напрямку руху газів (рис. 2.13);
- димовсмоктувачі-пиловловлювачі найбільш поширені в промисловості (рис. 2.14).

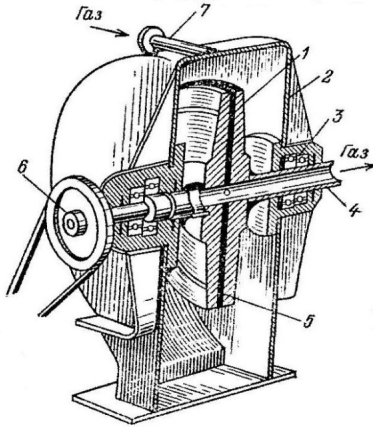


Рис. 2.13. Роторний пиловловлювач ЦРП: 1 – ротор; 2 – корпус; 3 – опора; 4 – полий вал; 5 – радіальний канал; 6 – шків; 7 – патрубок

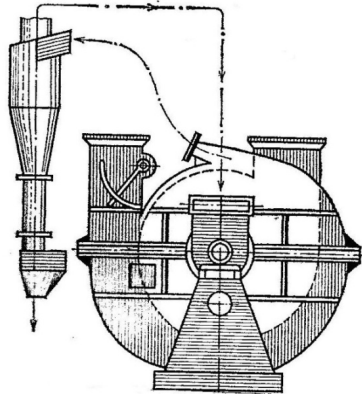


Рис. 2.14. Димовсмоктувач-пиловловлювач: 1 – вентилятор; 2 – забірний патрубок; 3 – циклон; 4 – бункер для розвантаження

Димовсмоктувач-пиловловлювач типу ДП-10 із циклоном ЦН-15У (рис. 2.14) призначений для переміщення газів та очищення їх від частинок пилу розміром >15 мм. Апарат може бути використаний у якості першого ступеня очистки перед тканиними фільтрами й електрофільтрами. Переміщення газів відбувається за

рахунок різниці тиску, що утворюється робочим колесом, який обертається на валу. Під дією відцентрових сил пил відкидається до периферії, разом із невеликою кількістю газу (8-10%) відводиться для остаточного відділення через пиловідвідний патрубок у високий малогабаритний циклон, з'єднаний з уліткою газоходом. Пил із циклона поступає в пилоприймач через герметичний бункер або спускний стояк із затвором. Із циклона очищений потік повертається в центральну частину улітки й колеса. Пиловий концентрат продавлюється через циклон за рахунок різниці тисків між периферією та центром колеса. Із центральної зони улітки очищений газ через направляючий апарат поступає в робоче колесо димовсмоктувача, а потім через кожух викидається в димову трубу.

Регулювання продуктивності димовсмоктувача здійснюється шибером, при закриванні якого потік віджимається до периферії улітки. Для захисту стінок від зносу передбачаються захисні козирки з полосової сталі, що розташовані на боковинах улітки в периферійній зоні. Технічні характеристики димовсмоктувачів-пиловловлювачів наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Технічні характеристики димовсмоктувачів-пиловловлювачів

| Найменування | ДП-8 | ДП-10 |
|--|------------|-------------|
| Діаметр робочого колеса, м | 0,8 | 1,0 |
| Продуктивність, м ³ /год. | 8000-10000 | 14000-20000 |
| Повний тиск при t=20 ⁰ С, Па | 1650-1400 | 2500-2100 |
| Допустима запиленість газів, г/м ³ | 100 | 100 |
| Діаметр циклону(типу ЦН-15У), м | 0,3 | 0,45 |
| Втрати тиску в циклоні при t=20 ⁰ С, Па | 800 | 800 |

РОЗДІЛ 3 ФІЛЬТРИ ТА ЕЛЕКТРОФІЛЬТРИ

3.1. Загальні відомості про фільтрацію, види фільтрів і методи очищення

В основі роботи пористих фільтрів усіх видів лежить процес фільтрації газу через пористо-фільтруюче середовище, в ході якого тверді або рідкі частинки, зважені в газі, затримуються в них і газ повністю проходить через неї.

Фільтрувальні пористі перегородки, що використовуються, за своєю структурою досить різноманітні, але, в основному, вони складаються з волокнистих або зернистих елементів, що умовно можна поділити на такі типи.

Гнучкі пористі перегородки:

а) тканинні матеріали з природних, синтетичних та мінеральних волокон;

б) нетканинні волокнисті матеріали (войлок, повсть, клеєні й голкопробивні матеріали, папір, картон, волокнисті мати);

в) пористі листи (губчата гума, пінополіуретан, мембранні фільтри).

Напівжорсткі пористі перегородки – шари волокон, стружка, в'язані сітки, що розташовані на опорних улаштуваннях або затиснуті між ними.

Жорсткі пористі перегородки:

а) зернисті матеріали – пориста кераміка й пластмаса, спечені або спресовані порошки матеріалів (металокераміка), пористе скло, вуглеграфітові матеріали тощо;

б) волокнисті матеріали – сформовані шари зі скляних і металевих волокон;

в) металеві сітки й перфоровані листи.

Зернисті шари:

- а) нерухомі, вільно насипані матеріали;
- б) періодично або неперервно переміщувальні матеріали.

Потік аерозолі в об'ємі фільтруючого матеріалу багатократно дробиться на дрібні струмені, які безперервно змиваються при обтіканні окремих елементів (волокон і зерен), що сприяє наближенню частинок до поверхні елементів або пор і їх осіданні на них та утриманню силами адгезії.

У фільтрах вловлені сухі частинки накопичуються в порах або утворюють пиловий шар на поверхні перегородки і, таким чином, самі стають частиною фільтрувального середовища. Однак, з накопиченням частинок розмір пор і загальна пористість перегородки неминуче зменшується, а опір руху газів зростає, тому у визначений момент виникає необхідність руйнування й виведення пилового осаду. У ряді випадків потребує заміни забрудненого фільтру або фільтрувального матеріалу. Таким чином, процес фільтрації в більшості випадків передбачає періодичну регенерацію фільтрів. При вловлюванні рідких частинок накопичення рідини може виводитися з пористої перегородки самостійно, тобто фільтр піддається саморегенерації.

Сучасні фільтри, залежно від призначення й величини вхідної та вихідної концентрації вловлюваної дисперсної фази, умовно поділяють на три класи.

Фільтри тонкої очистки

Фільтри тонкої очистки називаються високоефективними або абсолютними фільтрами. Вони призначені для вловлювання з дуже високою ефективністю (звичайно, більше 99%) субмікронних частинок із промислових газів і повітря при низькій вхідній концентрації (менше 1 мг/м^3) та малій швидкості фільтрації (менше 10 см/с). Такі фільтри використовуються

для вловлювання високотоксичних частинок, а також для тонкого очищення повітря під час проведення деяких технологічних процесів або в особливо чистих приміщеннях, в яких повітря є робочим середовищем. Звичайно, ці фільтри не підлягають регенерації.

Фільтри для очищення атмосферного повітря використовуються в системах приточної вентиляції та кондиціонування повітря. Вони розраховуються на роботу при концентрації пилу менше 50 мг/м^3 , високій швидкості фільтрації (2,5-3 м/с). Фільтри такого класу бувають нерегенеруючими, а також періодично регенеруючими.

Промислові, тканинні та зернисті фільтри

Промислові фільтри бувають тканинними, зернистими, грубоволокнистими. В основному, вони використовуються для очистки промислових газів із високою концентрацією дисперсної фази (до 60 г/м^3). Для періодичного й безперервного віддалення накопичуваного на перегородці пилу фільтри цього класу мають улаштування для регенерації, що дозволяють підтримувати продуктивність на заданому рівні та повертати цінні продукти у виробництво. Фільтри цього класу часто є складовою частиною технологічного обладнання.

Розвиток техніки фільтрування спрямований на:

- утворення нових засобів регенерації для фільтрувальних матеріалів, які б дозволяли працювати на підвищених швидкостях зі збереженням ефективності пиловловлювання;
- розробку нових видів фільтрувальних матеріалів, по-перше, усього войлочного типу, що дозволяють знизити гідравлічний опір, підвищити продуктивність по газу і термін роботи фільтрувальних елементів.

При конструюванні фільтрів з'являється тенденція до модульної будови апаратів, що спрощують їх монтаж,

виготовлення й транспортування, а також до компактного розміщення фільтрувальних матеріалів в об'ємі апарата при полегшенні доступу до фільтрувальних елементів для їх ремонту, заміни й монтажу. Тканеві фільтри складаються з корпусу або рами (рис. 3.1) циліндричної або прямокутної форми, виготовленого з листової сталі, в якому розміщені всі вузли фільтру [6, с. 105].

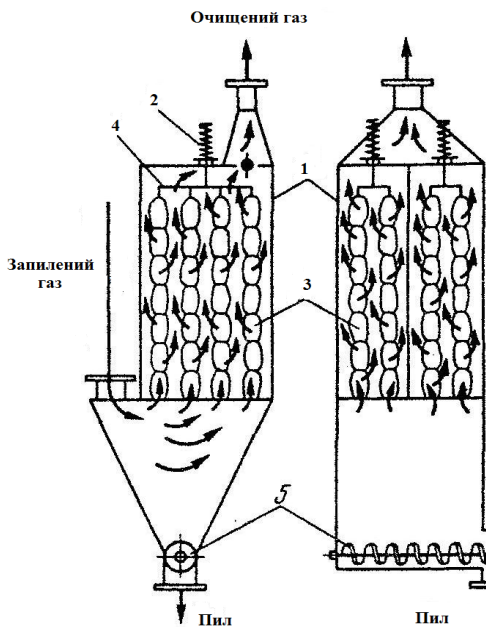


Рис. 3.1. Рукавний фільтр:

1 – рама; 2 – струшуючий механізм; 3 – рукав; 4 – шнек

Суттєвим елементом корпусу є бункер, що має конічну або пірамідальну форму, кут нахилу стінок якого повинен бути більшим за кут природного відкосу вловленого пилу. У нижній частині бункера встановлюється шнековий або скребковий транспортер і шлюзовий затвор, призначений для вивантажування вловленого пилу. Бункер і корпус розділені

горизонтальною решіткою, в якій зроблені отвори з патрубками для кріплення рукавів. Корпус вертикальними стінками розділяється на секції з метою зменшення перевантаження фільтрувального матеріалу й більш ефективної регенерації. У секціях прямими рядами або в шахматному порядку розміщуються рукави.

На корпусі знаходиться механізм керування регенерацією, коробка переключення секцій на продувку з калорифером для подачі у фільтр підігрітого повітря, а також колектори, через які запилений газ і продувочне повітря підводиться до фільтра, а очищене повітря відводиться від нього.

У тканинних фільтрах використовують фільтрувальні тканини двох типів:

- звичайні тканини, виготовлені на ткацьких верстатах;
- войлочні, що отримуються шляхом механічного переплутування волокон голкопробивним шляхом.

Осідання частинок пилу в початковий період роботи фільтра за рахунок механізмів торкання, інерції, дифузії та електростатичної взаємодії відбувається на волокнах, розташованих на поверхні ниток, а також у ворсі. Волокна, що знаходяться всередині кручених ниток, в осіданні практично участі не беруть, оскільки потік газу проходить, в основному, через отвори між нитками. Далі має місце процес осідання частинок та формування мостів над порами і в самих порах, у результаті чого утворюється суцільний шар пилу, який сам стає вторинним фільтруючим середовищем, ефективність очищення різко зростає. Осідання частинок у поверхневому шарі та в середині запиленої тканини ґрунтується значною мірою на ситовому ефекті, оскільки пори в шарі, пилинки, що осідають, і частинки, що вловлюються, мають однакові розміри.

Недолік тканинних фільтрів полягає в наступному:

- при низьких вхідних концентраціях пилу процес утворення шару займає багато часу;
- ефективність очищення тонких тканий після регенерації різко зменшується;
- у тканинних фільтрах доцільно використовувати невеликі швидкості (0.5-1.2 см/с);
- при більших швидкостях пиловий шар стискається й росте опір.

Розглянуті недоліки тканинних фільтрів значною мірою усуваються при використанні войлоків (фетрів) в якості фільтруючого матеріалу. Ефективність вловлення частинок у цьому випадку не буде визначатися наявністю раніше сформованого шару пилу; рівномірний розподіл волокон по всій поверхні та по товщині фетру за відсутності наскрізних отворів забезпечує рівномірну участь волокон у процесі осідання частинок. Процес фільтрування відбувається в об'ємі матеріалу. Під час очищення фетрів усередині них залишається частка пилу, що забезпечує дуже високу ефективність вловлення дрібних і навіть субмікронних частинок. Ця принципова відмінність войлочних фільтруючих матеріалів від тканинних дає можливість у 5 разів підвищити навантаження по газу, а також проводити регенерацію матеріалу без припинення подачі пило-газового потоку.

3.2. Основні властивості фільтрувальних матеріалів

Усі фільтрувальні матеріали можна розподілити на чотири основні типи, вони розрізняються тим, що виготовляються з різних матеріалів:

- природних волокон тваринного й рослинного походження (вовняні, льняні, бавовняні, шовкові);
- штучних органічних волокон (лавсан, капрон, нітрон, оксалін);
- природних мінеральних волокон (азбест);

- штучних неорганічних волокон (склотканини, металеві та металокерамічні матеріали).

Ефективність пиловловлювання, гідравлічний опір, термін служіння фільтрувальних тканин у більшості залежать від їх структури, способу плетіння, густини, товщини і сплетіння ниток. Густина тканини характеризує частоту розташування ниток в одиниці довжини (кількість ниток на 10 см). Більш щільні тканини мають підвищену міцність, більш високий коефіцієнт пиловловлювання й одночасно з цим підвищений гідравлічний опір у процесі фільтрування, низьку повітряну проникненість, а також і більш низьку пропускну властивість при розташуванні їх у рукавних фільтрах. Властивості фільтрувальних тканин залежать, в основному, від засобу переплетіння. Є три основні види плетінь: саржеве, полотняне й сатинове. Саржеве плетіння характеризується наявністю на поверхні тканини діагональних полосок. Нитки основи й утка в саржевих тканинах перекриваються у співвідношенні 2×2 ; 1×3 ; 3×1 і мають можливість переміщення відносно один до другого, сприяючи цим ефективності регенерації.

Тканини полотняного переплетіння більш густі. Вони характеризуються високою ефективністю пиловловлювання, але мають більший опір внаслідок недостатньої регенерації.

Сатинові (атласні) тканини характеризуються гладкою поверхнею. Вони більш крихкі в порівнянні з полотняними та саржевими плетіннями, мають гарні регенеруючі властивості. Сатинові тканини відносно них не такі міцні. Використовувати їх у каркасних фільтрах не бажано, тому що під час натягування на каркас вони можуть бути ушкоджені. Для підвищення міцності сатинових тканин іноді підвищують їх густину, але це приводить до зниження повітряної проникливості.

Неткані матеріали. До них відносяться фільтрувальні шерстяні фетри, що виготовляються з натуральної вовни, а також голкопробивні войлоки на

основі синтетичних волокон. Фетри або войлоки – це щільні шари неупорядковано переплутаних штапельних волокон, рівномірно розподілених в об'ємі. Вони мають високу стійкість до багаторазових згинань, зазвичай товщина фетрів складає 1,6-3,2 мм, а маса 1 м² матеріалу змінюється від 0,4-0,6 кг.

Для ущільнення й переплетіння шарів синтетичних волокон для виготовлення використовуються голкопробивні машини. Для досягнення потрібної міцності і стабільних розмірів волокна після набивки на сітчатий тканинний каркас піддаються термічній і хімічній обробці.

Синтетичні фетри виготовляють із поліефірних, нітронових та інших волокон, а також із термостійких: тефлону, скла, нержавіючої сталі. Вони використовуються, в основному, у фільтрах зі зворотньою струйною продувкою або при імпульсній регенерації. Прохідна концентрація пилу дуже низька.

Аеродинамічні властивості чистих фільтрувальних тканин характеризуються повітряною проникливістю – витратами повітря при визначеному перепаді тиску (50 Па). Для підтримання продуктивності фільтру при заданому значенні тиску тканини регенерують шляхом продування в протилежному напрямку, механічним страхуванням або іншими методами. Після визначеного терміну роботи фільтра з чергуванням процесу фільтрації та регенерації остаточна кількість пилу в тканині стабілізується і відповідає так званому рівноважному пилоскладу тканини й остаточному опору запиленої тканини. Значення цих величин залежить від типу фільтруючого матеріалу, розмірів і властивостей пилових частинок, відносної вологості газів, методу регенерації та інших факторів.

Конструктивні особливості тканинних фільтрів

У залежності від призначення, існуючі апарати з гнучкими фільтрувальними перегородками поділяються на

фільтри для очищення аспіраційного повітря та для очищення технологічних газів.

Фільтри для очищення технологічних газів та аспіраційного повітря використовуються для агресивних, вибухонебезпечних і високотемпературних газів із концентрацією пилу до 100 г/м^3 .

За формою фільтрувальних елементів розрізняють фільтри з круглими та плоскими рукавами й розгорнутою поверхнею. Незалежно від форми фільтрувальних елементів вони можуть виготовлятися з каркасом, на який натягується фільтрувальний матеріал або без нього.

За напрямком потоків очищених газів фільтри поділяються на апарати, в яких очищені гази проходять із середини на зовнішню поверхню та апарати з рухом потоку із зовні всередину фільтрувальних елементів.

За способом підводу запиленого потоку до фільтрувальних елементів розрізняють фільтри з верхньою, нижньою та комбінованою роздачею.

За формою корпусу фільтри розподіляються на циліндричні й прямокутні. Залежно від умов роботи фільтри виготовляють у звичайному або вибухонебезпечному виконанні. Вони можуть працювати при високому тиску і високій температурі. Фільтри у звичайному виконанні розраховані на тиск або розрідження в корпусі не більше 5000 Па і температурі не більше $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

В існуючих апаратах видалення пилу у фільтрувальних елементах здійснюється трьома способами:

- деформацією тканини, що викликає розтріскування шару й переміщення пилу;
- утворенням у фільтрувальних елементах прискорень, що призводять до появи напружень між шаром пилу й тканиною та зриву шару під впливом сил інерції;

- протитечним продуванням, при якому потік чистого газу проходить через фільтрувальну перегородку й утворює в шарі пилу напруження аеродинамічного походження, що сприяє його видаленню.

Суттєвий вплив на процеси фільтрування й регенерації має конструкція фільтрувальних елементів.

Найпростішим і найпоширенішим фільтрувальним елементом є циліндричні рукава (рис. 3.2) [19].



Рис. 3.2. Спосіб підводу газопилового потоку в рукави: а – з нижнім підводом; б – з верхнім підводом; в – з двостороннім підводом

Суттєве значення має спосіб подачі пилогазового потоку в рукави. При верхньому підводі (б) утворюються сприятливі умови для виведення вловлюваного пилу. У ряді випадків це сприяє утворенню режиму авторегенерації без зовнішнього імпульсу й сил регенерації. З'являються можливості довгих рукавів, але влаштування для натягування рукавів виявляється складним.

Ефективність роботи фільтрів у більшій мірі залежить від улаштування вузлів кріплення фільтруючого елемента до корпусу фільтра.

Пропускання дуже незначної кількості неочищеного газу у вузлах кріплення значно знижує ефективність фільтрів. Якщо брати до уваги, що в промислових фільтрах число рукавів вимірюється сотнями й тисячами, то слід

уважно піходити до конструювання, виготовлення та збирання елементів кріплення рукавів. Одним із найважливіших питань конструювання та експлуатації фільтрів є спосіб регенерації тканин.

Регенерація фільтрувальних елементів зводиться до прикладення навантаження на запилений фільтрувальний елемент. Такі навантаження забезпечують на завершальному етапі руйнування й виділення пилового шару від тканинного матеріалу.

Для прикладення навантаження можуть використовуватися способи:

- механічні (струшування);
- пневматичні (різні види зворотної і неперервної продувки; пульсуючий, імпульсний струмінь) (рис. 3.3).

Способи регенерації рукавних фільтрів

Механізм руйнування пилового шару при регенерації різними методами має загальні риси. Практично у всіх способах руйнування пилового шару здійснюється слабким адгезійним зв'язком, звичайно, без руйнування взаємодії частинок із волокнами.

У залежності від способу регенерації розрізняють наступні п'ять типів фільтрів:

- фільтри з механічним трясінням;
- фільтри з трясінням при одночасній продувці повітря з низьким потоком (<10 кПа). В окремих випадках, при пухкій структурі шару, швидкість може досягти 2 м/хв;

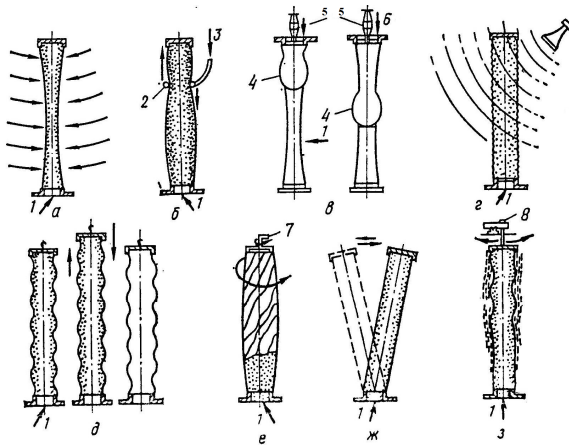


Рис. 3.3. Способи регенерації рукавних фільтрів: а – зворотнє посекційне продування; б – струйне продування; в – імпульсне продування; г – акустична регенерація; д – механічне струшування; е – крутіння рукавів; ж – качання рукавів; з – вібрація; 1 - напрямок руху запиленого газу; 2 – кільце, що рухається; 3 – продувне повітря; 4 – камера стиснутого повітря; 5 □ ежектор; 6 – імпульс тиску; 7 – реверсивний обертальний пристрій; 8 – вібратор

- фільтри з однією оборотною повітря низького тиску (<10 кПа), що може подаватися безперервно або у вигляді пульсуючого потоку. Спосіб знаходить використання переважно при довжині рукавів до 10 м і діаметрі 300 мм. Фільтри оснащуються рукавами із синтетичної тканини, склотканини. Залежно від властивостей пилу навантаження можуть складати від 0,6 до 2,5 м/хв;

- фільтри з імпульсною регенерацією повітрям високого тиску ($0,5 \times 10^5$ до 7×10^5 Па) мають рукави, одягнені на каркаси. В процесі регенерації рукава він роздувається, що забезпечує допоміжний механічний вплив. Прискорення пилу супроводжується продувкою запиленого фільтрувального матеріалу. Швидкості

фільтрування коливаються від 1,5 до 2,5 м/хв. Хоча використання стислого повітря не є дешевим способом регенерації, але фільтри з імпульсною продувкою мають широке розповсюдження;

- фільтри зі струменевою продувкою характеризуються тим, що повітря оборотної продувки проходить не через усю поверхню рукавів, а лише через вузьку ділянку, розташовані проти кільцевого струменя зі щілиною 0,8-6 мм. Сопло безперервно переміщається по висоті рукава, забезпечуючи очистку всієї поверхні. При цьому пил відділяється повністю, а ефективність пиловловлення забезпечується властивістю чистого фільтрувального матеріалу (повсть) захоплювати частинки пилу. Перевагою таких фільтрів є зростання швидкості фільтрування (до 6 м/хв). Однак вони використовуються лише при знижених концентраціях пилу на вході (не більше 50 мг/м³) [19, с. 177].

Зернисті фільтри

Використання зернистих фільтрів є доцільним для очищення газів при температурах, значно вищих, ніж у рукавних фільтрах. Крім того, економічно вигідною є суха комплексна очистка газів від пилу й газоподібних шкідливих речовин, особливо за умови використання шихтових матеріалів у якості сорбенту або каталізатора. У ряді випадків фільтри можуть бути використані для вловлення абразивного пилу, що злипається, а також для очищення вологих газів, тобто у випадках, коли використання сухих електрофільтрів і рукавних фільтрів недоцільне.

Зернисті фільтри знайшли широке використання при обезпиленні рідких і кошовних металів. Крім фільтрування, гранули можуть виконувати функції енергоносіїв і сорбента або каталізатора при сполученні процесу фільтрування з адсорбційним або каталітичним процесом.

У розвинених державах на цементних, вапняних, гіпсових підприємствах, у хімічній та інших галузях промисловості завдяки безперервному вдосконаленню способів регенерації зернисті фільтри знаходять все більше використання. Конструктивно ці апарати достатньо прості, мають низькі експлуатаційні витрати, надійні в роботі та забезпечують достатньо високу ступінь очищення газів [19].

Розроблено велику кількість апаратів із зернистим шаром, що відрізняються як конструкцією фільтрувальних елементів так і способом регенерації. Перспективними можна вважати конструкції з імпульсною продувкою шару без застосування механічних засобів регенерації. Залежно від пилу, що вловлюється, і режимів роботи зернисті фільтри забезпечують ступінь очищення газів до 95-99,5% при швидкості фільтрування 15-35 м/хв. Гідравлічний опір фільтрів 3000 Па. Як правило, зернисті фільтри використовуються для обезпилення невеликих об'ємів газу.

На рис. 3.4 а, б, в подано схеми зернистих фільтрів, що регенеруються різними методами. Особливістю фільтрів, що регенеруються безперервним рухом зернистого шару (рис. 3.4 а) є те, що шар гранул 3, в якому осідають частинки пилу, повільно рухається зверху вниз.

На вібруючому екрані 2 вловлені частинки пилу відсіюються й потрапляють у бункер 1. Очищений фільтруючий матеріал за допомогою механічного або пневматичного конвеєра 9 знову подається нагору в бункер 6. Для безперервного оновлення рухомого шару необхідна громіздка і дороговартісна система циркуляції гранул. Тому такі фільтри не отримали широкого розповсюдження.

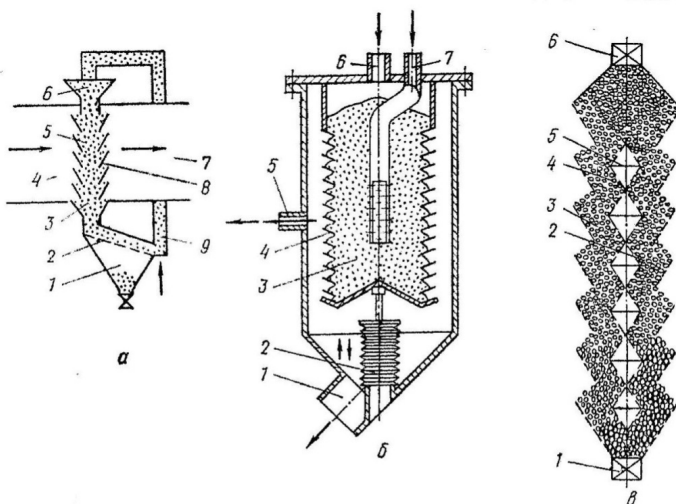


Рис. 3.4. Схеми зернистих фільтрів:

- а – із регенерацією руху шару; 1 – бункер для відпрацьованих зерен; 2 – вібрсито; 3 – зерниста фільтрувальна перегородка; 4, 7 – газоходи брудного і чистого газу; 5, 8 – перфоровані екрани; 6 – бункер для свіжих зерен; 9 – лінія повернення продукту; б – із регенерацією руху шару для сушарок;
- 1, 6 – штуцери для завантаження свіжих і вилучення відпрацьованих зерен; 2 – сільфон; 3 – зерниста фільтрувальна перегородка; 4 – решітки; 5, 7 – газоходи чистого і брудного газу; 8 – перфорований екран; в – із регенерацією імпульсної продувки при періодичному перемішуванні вертикального шару; 1 – розвантажувальний пристрій; 2, 3 – перфоровані екрани (сітки); 4 – зерниста фільтрувальна перегородка; 5 – сопло; 6 – завантажувальний пристрій

Зернисті фільтри (рис. 3.4 б) мають ті переваги, що дозволяють повертати безпосередньо в технологічний цикл фільтруючий шар разом із пилом. В якості фільтрувального матеріалу використовуються шматки породи розміром $12 \div 40$ мм.

На рис. 3.4 в наведена схема апарату із зернистим шаром, який регенерується імпульсною продувкою з періодичним рухом вертикального шару, відмінними особливостями якого є :

- можливість роботи при більш високій температурі;
- відсутність вузлів, що обертаються;
- можливість використання апарату при комплексній очистці газів у адсорбері.

До недоліків таких апаратів відноситься нерівномірне розподілення імпульсів потоку при регенерації фільтрувальної поверхні та отримання зернистого шару на жалюзійних решітках.

Випробування такого апарату проводилися в період колишнього СРСР у Запорізькій філії Науково-дослідного інституту очистки газів і показали гарні результати. Зернистий матеріал, розташований у газонепроникливих перегородках, під час випускання зерен через розвантажувальне обладнання (рис. 3.5) залишається без руху, а віддаляється лише та частина шару, перед якою немає перешкоди, що розташована між бункером 3 та нижніми краями нахилених перегородок.

Подача короткочасових імпульсів через перегородки 5 призводить до нерівномірного збору зерен з пилом перегородок, що є недоліком апарату. Крім того, при фільтруванні через зернисті фільтрувальні перегородки виникає значна втрата імпульсу енергії.

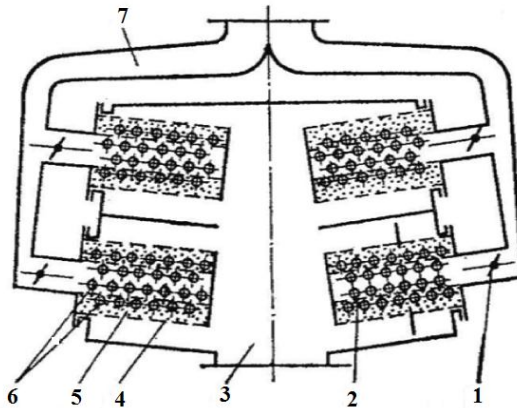


Рис. 3.5. Схема зернистого фільтра з регенерацією імпульсної продувки при періодичному переміщенні вертикального шару: 1 – заслінки; 2,4 – перфоровані екрани; 3,7 – газоходи забрудненого й чистого повітря; 5 – зерниста фільтрувальна перегородка; 6 – теплообмінні труби

Але з урахуванням позитивних особливостей апарату з регенерації імпульсною продувкою в Запорізькій філії НДІ ГАЗ були розроблені принципово нові конструкції зернистих фільтрів типу ФЗВІ для комплексного очищення газів для твердих і газоподібних шкідливих речовин при високих температурах. Під час заповнення апарату інертним фільтрувальним матеріалом він працює як пиловловлювач, наприклад, під час очищення газів сушильних барабанів магнезиту у вогнетривкій промисловості. При заповненні апарату каталізатором він використовується як фільтр-реактор, наприклад, при очищенні від пилу та окису вуглецю газів регенерації каталізатора (рис. 3.6).

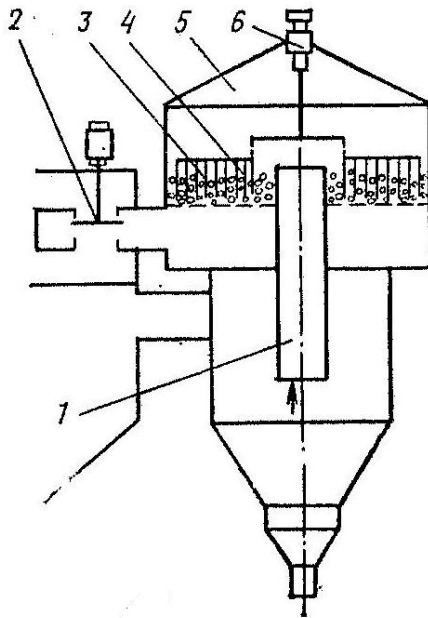


Рис. 3.6. Схема зернистого фільтру з регенерацією і
 оборотною продувкою: 1 – глушник циклона; 2 – клапан;
 3 – зерниста фільтруюча перегородка; 4 – скребки;
 5 – корпус; 6 – привід

При заповненні фільтра сорбентом він використовується як фільтр-адсорбер, наприклад, під час очищення від фтористих та інших шкідливих сполучень, що є в газах флюсплавильних, скловарильних та інших печей. Апарат ФЗВІ має відкриту фільтруючу поверхню і під час подачі імпульсу стиснутого повітря разом із вловленим пилом може бути відкинута частина будь-якого шару фільтруючого матеріалу. Конструкція цього апарата дозволяє постійне або періодичне просування фільтруючого шару шляхом скидання його з нижньої частини касети імпульсним тиском (рис. 3.7).

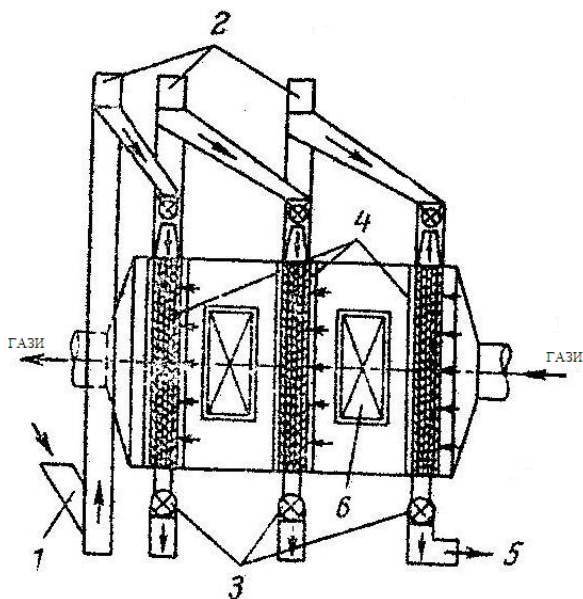


Рис. 3.7. Фільтр із рухомими шарами зернистого матеріалу: 1 – короб для подачі свіжого зернистого матеріалу; 2 – живильник; 3 – засувка; 4 – фільтруючі шари; 5 – короб для виводу запиленого матеріалу; 6 – люльки

Властивості сипучості зернистих матеріалів використовуються для утворення фільтрів з рухомим середовищем та періодичним або неперервним відділенням з установки шару зерен, забитого пилом на регенерацію. На рис. 3.7 схематично показана дослідна установка з декількома послідовно розташованими зернистими шарами. Якщо фільтруюче середовище складається з того ж матеріалу, що і вловлений пил, забруднені гранули виводяться із системи газоочиснення й використовуються в технологічному процесі.

3.3. Фізичні особливості електричного очищення газів

Електрофільтри – це пристрої, в яких очищення газів від витаючих у них твердих або рідких частинок відбувається під дією електричних сил. Для цього частинкам передається електричний заряд. У результаті дії електричного поля на заряджені частинки вони виводяться з очисного газового потоку й осідають на електродах.

Зарядження частинок в електрофільтрах відбувається в полі короткого розряду. Короткий розряд – це різновид електричного розряду, характерний для систем електродів із різким неоднорідним полем. Наприклад, напруга електричного поля суттєво зростає в напрямку до внутрішнього електрода (дроту) і досягає максимального значення біля його поверхні.

Іонізаційні процеси під час короткого заряду зосереджуються у вузькому проміжку, де напруга поля найбільша, тобто поблизу короніруючого електрода. У зоні іонізації є позитивні іони й електрони, що в результаті виходу із зони іонізації перетворюються в негативні іони, а при негативній полярності короніруючого електроду позитивні іони швидко досягають його. У зовнішній зоні короткого розряду наявні тільки негативні іони, що утворюють у міжелектронному просторі об'ємний заряд.

У зовнішній зоні короткого розряду іонізаційні процеси відсутні, оскільки там напруга поля для іонізації недостатня. Струм короткого розряду забезпечується за рахунок об'ємного заряду, що існує між електродами. Якщо в зовнішній зоні короткого розряду, що займає більшу частину в міжелектродному просторі, знаходяться тверді або рідкі частинки, то іони з об'ємного заряду осідають на поверхні цих частинок і передають їм електричний заряд.

Переважно в одному й тому ж полі короткого розряду відбувається й заряд частинок та їх виділення з газового потоку за рахунок їх руху під дією поля в

напрямку, що перпендикулярний газовому потоку. Це дозволяє спростити конструкцію апаратів і зробити їх більш компактними. Крім того, при дипольному короткому розряді можна отримати розподіл поля, що сприяє підвищенню ступеня очищення газів у електрофільтрах.

Конструктивна схема електрофільтра подана на рис. 3.8 а, б, в.

Поміж двох площин (рис. 3.8 в), що осідають, або в округлій поверхні 2 (рис. 3.8 б) натягнуто ряд дротів (1). У простір між проводом 1 і площинами 2 надходить запилений газ. У полі коронуючого електрода 1 під час подачі високої напруги на провід виникає розряд. Під час цього частинки заряджаються та під дією поля рухаються до осаджувальних площин, де осідають і з яких періодично видаляються. Отже, концентрація пилу в газі при проходженні його через електрофільтр значно зменшується. Електрофільтри з електродами, що осідають, називаються пластинчастими (рис. 3.8 в). Другий тип електрофільтрів (рис. 3.8 б) називається трубчастим. У нього використовується система циліндричних електродів, що осідають.

У трубчастих електрофільтрах підтримується вища робоча напруга ніж у пластинчастих. Але в пластинчастих електрофільтрах простіше проходить процес очищення великих об'ємів газів і видалення пилу з електродів.

Осідання частинок на електроди відбувається під дією електричного поля із зони газу, що проникають безпосередньо до електродів. Видалення частинок із цієї зони відбувається в результаті переміщення їх залишку до міжелектродного простору під дією поля й за рахунок зростання кількості частинок при турбулентних пульсаціях газу.

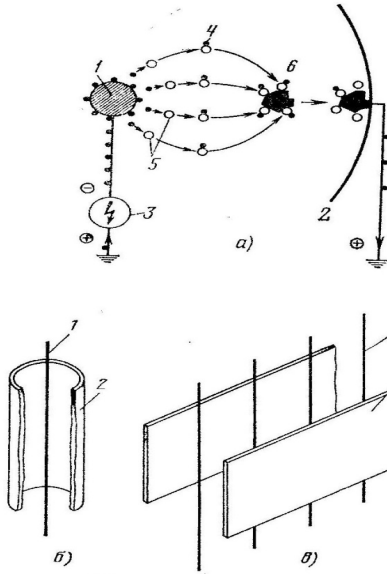


Рис. 3.8. Принципова схема роботи електрофільтра:
 а – процес електричного осадження частинки; б – електрофільтр із трубчастим елементом; в – електрофільтр із пластинчастими елементами: 1 – коронуючий електрод; 2 – електрод, що осідає на привід; 3 – агрегат електроживильника; 4 – електрон; 5 – молекула газу; 6 – частинка, що осідає

Процес електрогазоочистки має такі стадії:

- зарядка зважених у газі частинок;
- рух заряджених частинок до електродів;
- осідання частинок на електродах;
- видалення частинок, що осідають, з електродів.

Цей процес полягає в тому, що між електродами електрофільтра утворюється коронний розряд, що характерний для системи електродів із дуже неоднорідним полем. Така неоднорідність виникає в процесі відщеплення радіусів концентричного циліндра й дроту, що більший за

10, а також при відношенні радіуса дроту до міжелектродного проміжку, що менший за 0,1.

Коронний розряд виникає при досягненні визначеної напруги електричного поля, що називається критичною, наприклад, для повітря при атмосферному тиску і температурі 20 °С складає 15 кВ/см. Критичний напрузі електричного поля відповідає критична різниця потенціалів, підведених до електродів.

Критична напруга визначає початок виникнення коронного розряду в електрофільтрі. Із зростанням на електродах напруги, вищої за критичну, зростає напруга електричного поля в міжелектродному просторі й відповідно підвищується струм корони. При цьому в нормально працюючому електрофільтрі інтенсифікуються процеси зарядження й осідання частинок, тобто зростає ефективність їх уловлювання. Однак, напруга на електродах може підвищуватися до певного значення, при досягненні якого електрична міцність газового проміжку між електродами буде порушена іскровим або дуговим електричним розрядом, тобто настане прогалина міжелектродного простору.

Критична напруга коронного розряду для системи, що складається з трубчатого електроду, який осідає, і дротового коронуючого електроду (рис. 3.8 б) визначається залежністю:

$$U_0 = E_0 R \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (3.1)$$

Для системи, що складається з пластичних електродів і дротових коронуючих електродів (рис.3.8 в) вона визначається залежністю:

$$U_0 = E_0 R_1 \left(\frac{\pi H}{d} - \ln \frac{2\pi R_1}{d} \right), \quad (3.2)$$

де U_0 – критична напруга, В; E_0 – критична напруженість електричного поля, В/м; R_1 – радіус

коронуючого електроду, m ; H – відстань між коронуючим електродом та осаджувальним електродом, m ; d – відстань між сусідніми коронуючими електродами в ряду, m .

Із наведених залежностей видно, що зі зменшенням радіуса коронуючого електрода R критична напруга знижується, тобто виникає більш раннє запалювання корони, чим і пояснюється використання тонкого дроту. У промислових електрофільтрах при звичайно вживаних значеннях $R_1 = 0,001 \div 0,002$ м; $R_2 = H = 0,1 \div 0,15$ м значення критичної напруги перебуває в межах від 20 до 40 кВ. Конструктивність схеми електрофільтрів подані на рис. 3.9 а, б.

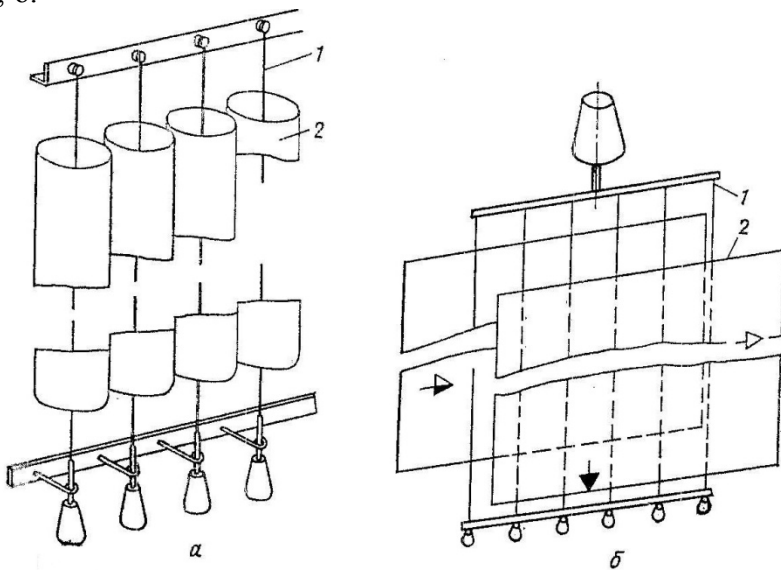


Рис. 3.9. Конструктивна схема електрофільтра: а – електрофільтр із трубчастим електродом; б – електрофільтр із пластинчастим електродом;
1 – коронуючі електроди; 2 – електроди, що осідають.

Між двома осідаючими поверхнями натягнуто ряд дротів. У просторі кожної із площин і дротами подається газопиловий потік. У полі коронного розряду, що виникає під час подачі струму високої напруги на дроти, частинки заряджаються й під дією поля рухаються до осідаючих поверхонь, з яких вони періодично віддаляються. Отже, концентрація пилу в газі при проходженні його через активну зону електрофільтра значно зменшується. У трубчастих електрофільтрах є можливість отримати більш високі показники робочої напруги, ніж у пластинчастих. Разом з тим у пластинчастих електрофільтрах простіше вирішуються питання обезпилення великих об'ємів газів в одному апараті.

Установка для електричного очищення газів (рис. 3.10) складається з електрофільтра, агрегатів живлення й систем транспортування вловленої пилу.

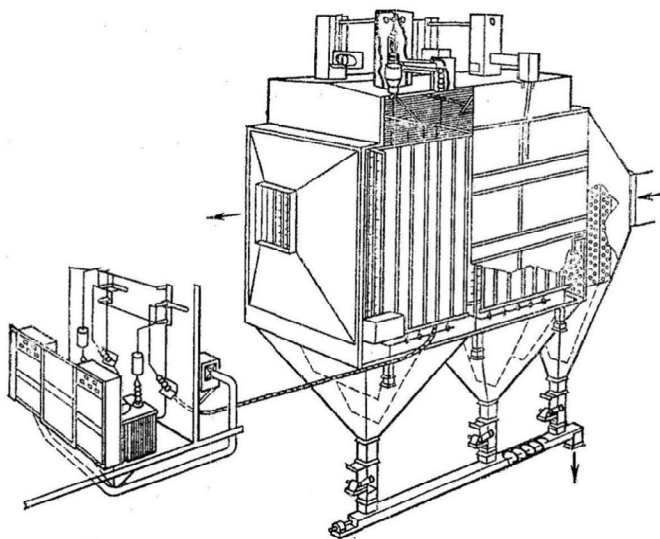


Рис. 3.10. Електрогазоочисна установка: 1 – корпус; 2 – електроди; 3 – газоподібне улаштування; 4 – нижня частина бункера.

Електрофільтр складається з металічного корпусу з розміщеними в середині його осідаючими й коронуєчими електродами. Перед електрофільтрами встановлюється газорозподільне обладнання, що забезпечує рівномірне розподілення газів в активній зоні апарата. Електрофільтр оснащується спеціальними приладами для видалення вловлюваного пилу. Осаджувальні електроди виконуються із металевих пластин різної конструкції або труб круглого чи шестикутного перерізу, а коронуєчі електроди виготовляються з округлого дроту або з вузьких смуг із виступаючими гострими кутами.

3.4. Сухі й мокрі електрофільтри

Сухі електрофільтри. Найпоширенішими сухими електрофільтрами, що використовуються в державах минулого СНД, є електрофільтри серії УГ – уніфіковані горизонтальні.

Вони можуть бути використані для очищення газів температурою до 250°C . Їхня висота від 4,2 до 12 м із загальною площею осідання від 420 м^2 до 36900 м^2 .

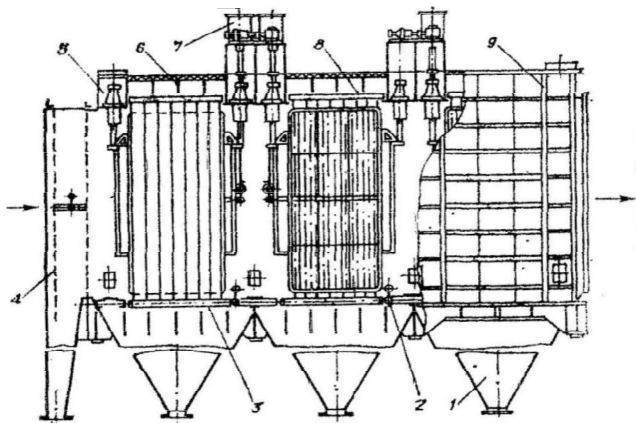


Рис. 3.11. Електрофільтр типу УГ: 1 – бункер; 2 – молоток механізму здригання; 3 – смуга здригання; 4 – газорозподільча решітка; 5 – ізоляторна коробка; 6 – осідаючий електрод; 7 – привід механізму здригання коронуючих електродів; 9 – корпус електрофільтра

На рис. 3.11 наведена типова схема електрофільтра УГ. У нього для видалення пилу з осідаючих, коронуючих електродів та газорозподільних решіток використовується ударно-молотковий пристрій. Під час обертання валу молоток 2 здригається, ударає по смузі здригання 3, удар передається на ексцентрично підвішені елементи осідаючого електрода 6, з деяким зміщенням відносно один одного, для того, щоб електроди одного поля здригались у різний час. У деяких електрофільтрах використовується вібраційна система страхування.

Ступінь очищення в електрофільтрі залежить від режиму регенерації електродів. Струшування осаджувальних і коронуючих електродів перших полів, де осідає найбільше пилу, повинно проводитися значно частіше, ніж електродів третього й четвертого полів. Про цьому поля повинні струшуватися в різний час, щоб наступне поле вловлювало вторинний виніс попереднього.

Мокрі електрофільтри. У деяких галузях виробництва широко використовуються мокрі електрофільтри [7, с. 138].

Електрофільтри типу ШМК (рис. 3.12) мають сталевий циліндричний корпус 1, футерований вогнестійкою цеглою або плиткою. Електроди – осідачі 2 виконані у вигляді шестикутних труб із свинцю, а коронуючі електроди 4 – із сталюго дроту, освинцьованого у вигляді шестигранної зірочки.

Верхні кінці коронуючих електродів прикріплені до рами підвісу, нижні мають грузила. Для попередження розгойдування електродів у період їх роботи всі грузила фіксуються в горизонтальній площині за допомогою

дистанційних скоб. Система коронуючих електродів за допомогою тяг 5 підвішена до опорних високовольтних ізоляторів, установлених на даху електрофільтра. Для уникнення охолодження ізоляторів і конденсації вологи на їх поверхні, ізоляторні коробки покриті теплоізоляцією 7 та мають електричні нагрівальні елементи.

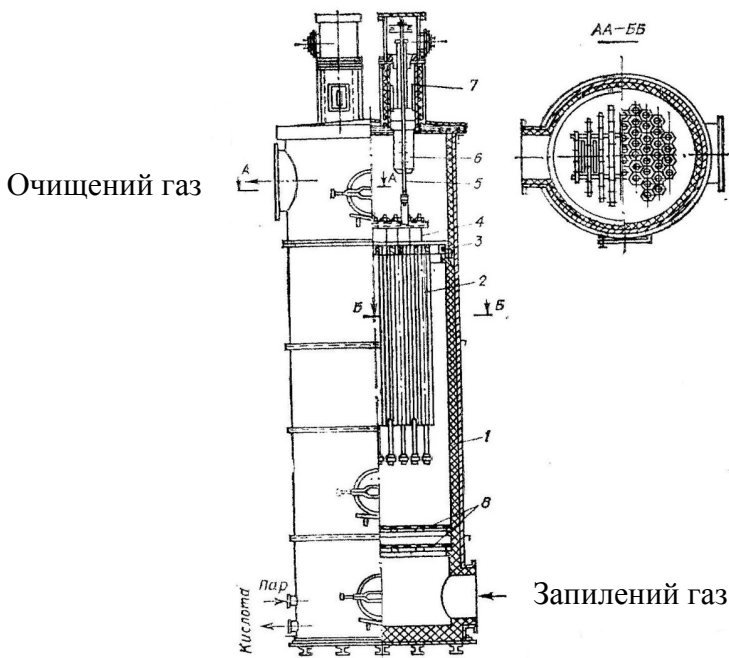


Рис. 3.12. Мокрий трубчастий електрофільтр ШМК :
 1 – корпус; 2 – електроди - осідачі; 3 – теплоізоляція; 4 – коронуючі електроди; 5 – ТЕНи; 6 – ізолятор; 7 – теплоізоляція; 8 – газорозподільна решітка.

Для рівномірного розподілу газів по секціях у нижній частині апарата встановлені подвійні газорозподільчі решітки 8. Пил з електродів видаляється гарячою водою після попереднього пропарення електрофільтра й доведення температури до 85-90⁰ С.

РОЗДІЛ 4

КОНСТРУКЦІЇ ВИХРОВИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

4.1. Апарати із зустрічними закрученими потоками

На даний час за вихровими пиловловлювачами закріпилася назва АЗЗП (апарати із зустрічними закрученими потоками). Початкова їх назва, що з'явилася після перекладу з німецької мови, була «Вихрові пиловловлювачі». Перші патенти ВПУ були подані у Федеративній Республіці Німеччина в 1953 році. На сторінках наукової літератури про вихрові пиловловлювачі в 1963 році були опубліковані статті на сторінках журналу «Staub». До цього часу у ФРН були закінчені багаточисельні експериментальні дослідження з виготовлення експериментальних моделей ВПУ. Пізніше розроблені нові конструктивні різновиди ВПУ, які більш ефективні.

Слід відмітити, що літературні дані про ефективність ВПУ часто мали рекламний характер, не відповідаючи дійсності. Але, безсумнівно, ВПУ мали й позитивні якості в підвищенні продуктивності щодо очищення запиленого газу. До 1972 року було розроблено 19 типорозмірів ВПУ з діаметром корпусу від 40 мм до 2 м. Продуктивність апаратів по газу складала від 20 до 315000 м³/год.

У той час ВПУ виготовлялися у ФРН фірмою «LufttechnikBayreuth», у США фірмою – «AredyneDevelopment», а також у Франції, Іспанії, Мексиці, Аргентині. У державах колишнього Радянського Союзу також були проведені численні дослідження, результати яких опубліковані у вищенаведеній літературі. Але найсуттєвішими були дослідження під керівництвом Б.С. Сажина, які отримали нову назву – апарати із

зустрічними закрученими потоками (ЗЗП) або АЗЗП, ця назва прижилася в Україні.

Концепція схеми першого ВПУ-ЗЗП Б.С. Сажина та Л.І. Гудима, запропонованого Є. Шаухлером та Х. Ценнеком у ФРН, показані на рис. 4.1 а. Під час його роботи газова суміш з уловленим пилом потрапляє в сепараційну камеру 1 через вхідний патрубок 2 і рухається знизу вгору вздовж осі апарата. Через тангенційний патрубок 3 під тиском 0,3 МПа подається повітря, струмінь якого біля стінки камери утворює периферійний (вторинний) закручений потік, що опускається зверху вниз і призводить до обертання первинний потік газової суміші. На своєму шляху вторинний потік приєднується до первинного й повністю в нього переходить біля профілірованого диска, що називається відбійною шайбою. Вловлені частинки випробовують у газовому потоці, який обертається за допомогою дії відцентрової сили, та переміщують із первинного у вторинний і транспортують останнім у нижню частину апарату під диск 5, де вони осідають у пиловому бункері 6. На рис. 4.1 напрямки руху очищеного газу, газової суміші та пилу показані відповідно світлими, комбінованими й темними стрілками.

У процесі розгорнутих досліджень було запропоновано понад 50 удосконалень описаного апарату ВПУ-ЗЗП та його елементів з метою підвищення ефективності пиловловлювання й зниження енерговитрат.

У цьому розділі будуть розглянуті найбільш цікаві для промисловості конструкції. Найважливі з них: обладнання вводу первинного потоку завихровувачем; заміна соплової подачі вторинного потоку під великим тиском; подача вторинного потоку через розподільчий ввід із рядом тенденційних сопел або через другий тип завихровувача під тиском, що істотно не відрізняється від тиску первинного потоку; використання в якості вторинного потоку очищеного газу; заміна профільтрованого диска на відбійну шайбу з

оптимальними розмірами й розташуванням вводу первинного потоку.

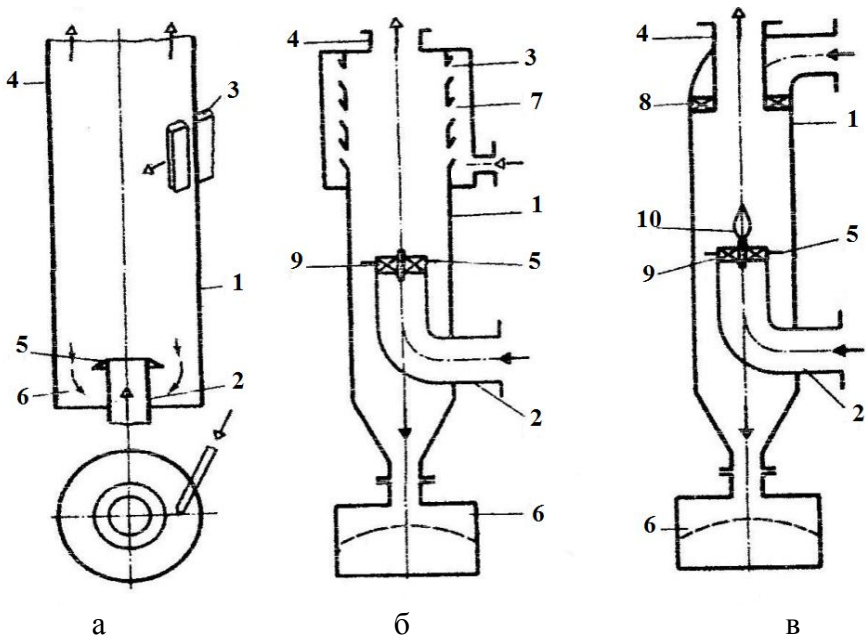


Рис. 4.1. Основні конструктивні особливості пиловловлювачів ЗЗП:

1 – сепараційна камера; 2 – вхід первинного потоку; 3 – сопло для вторинного потоку (а); 4 – глушник; 5 – відбійна шайба; 6 – пиловий бункер; 7,8 – розподільчі сопла (б) і суміжні із завихрювачем (в) входи вторинного потоку; 9 – завихрювач первинного потоку; 10 – обтікач

4.2. Різновиди конструкцій вихрових пиловловлювачів

У країнах СНД існують два конструктивні різновиди пиловловлювачів ЗЗП: із розподільним сопловим (4.1 а) та зосередженими (4.1 б, в) вводами вторинного потоку.

В апаратах із розподільним сопловим вводом вторинний потік закручується системою тангенційних сопел. Звичайно, по висоті пиловловлювача встановлюється декілька рядів сопел, що мають нахил до горизонту $15-30^{\circ}$ і розташовані по відповідних гвинтових лініях. Розподіл газу в соплі здійснюється із загального кожуха (рис. 4.1 б) або за допомогою газоходів, як показано на рис. 4.2 а.

Кількість рядів сопел, їх кількість у ряду й величина залежать від розмірів апарату, тиску вторинного потоку та його частки в загальній витраті газу.

Пиловловлювачі із зосередженим вводом вторинного потоку виникли в результаті пошуків способів зменшення тиску вторинного потоку, що виникає у вихідній трубі над верхніми соплами паразитних завихрювань і знижує ефективність сепарації пилу.

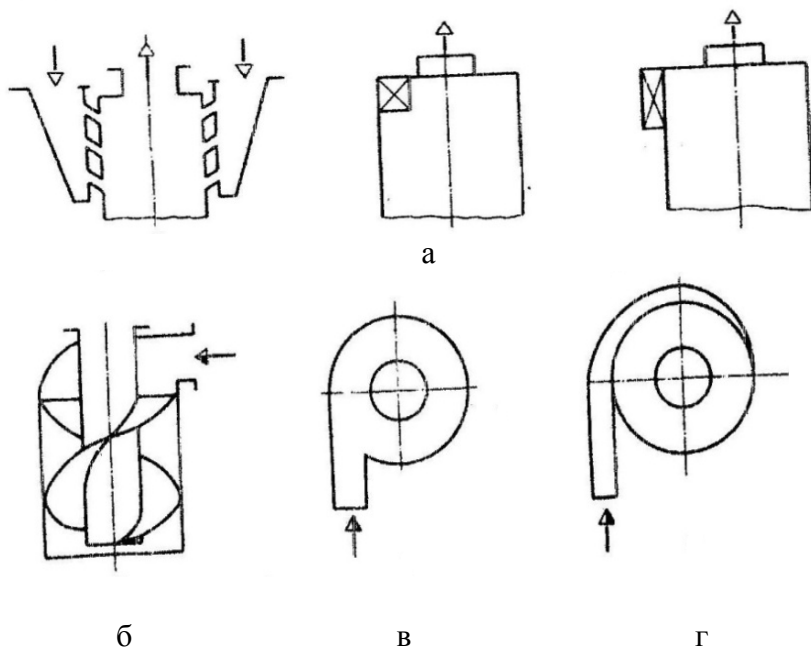


Рис. 4.2. Варіанти введення в пиловловлювачі ЗЗП вторинних газових потоків: а – розподілене введення; б, в,

г – зосереджене виведення відповідно з кільцевим, лопатевим, тангенціальним й уліточним завихровувачами

У ці апарати вторинний потік може подаватися через кільцевий лопаточний (рис. 4.2 б), тангенціальний (рис. 4.2 в) або уліточний (рис. 4.2 г) завихровувачі. Два останніх можуть бути нахиленими.

Апарати соплового типу використовують тоді, коли частка вторинного потоку в загальному його розході не перевищує 30-50%. У цьому випадку пил, особливо схильний до поглинання, надходить до апарата тільки з первинним потоком. Пиловловлення здійснюється одночасно з іншими технологічними процесами, для нормального протікання якого потрібно, наприклад, створити за допомогою сопел спеціальну гідродинамічну обстановку або розбавити первинний потік газом з іншими параметрами. Такі апарати складніші у виготовленні й експлуатації, ніж апарати із зосередженим вводом вторинного потоку, і не мають переваг за ефективністю пиловловлювання та енерговитратами.

В апаратах обох типів ввід первинного газового потоку постачається аксіально-лопатевим, тангенціальним або уліточним завихровувачами.

Потрібне співвідношення витрат газу по вводах установлюється за допомогою регулюючих заслінок.

Рис. 4.3 б демонструє схему, де завдяки вторинному потоку подається чистий газ. Цю схему використовують, в основному, при сопловій подачі вторинного газу з підвищеним тиском; при розрідженні високотемпературного запиленого газу холодним зовнішнім повітрям; у випадку необхідності подачі в апарат разом із запиленим іншого газу; проведення одночасно з процесом пиловловлювання іншого технологічного процесу, наприклад, сублимації.

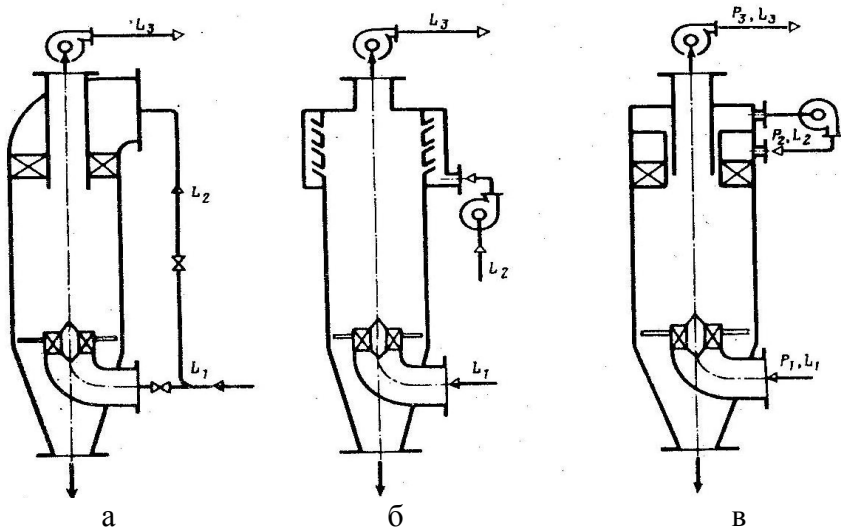


Рис. 4.3. Схеми вмикання (а-в) пиловловлювачів ЗЗП у систему газоочищення

Енергозатрати на пиловловлювання за описаною схемою достатньо високі, оскільки об'єм очищеного газу складає лише частину від усього об'єму газу, продутого через апарат. Вторинний газ можна подавати в апарат індивідуальним або загальним дуттєвим обладнанням, розташованим на хвості.

На рис. 4.3 в зображена схема з певною рециркуляцією, завдяки якій вторинним потоком подається очищений газ. При цьому з периферійної зони біля входу в глушник, де сконцентровані частинки, що не встигли відсепаруватися, забирають частину очищеного газу. Таке приймання сприяє [40] підвищенню ефективності пиловловлення, оскільки частина невловленого пилу повертається знову в апарат із вторинним газом і в подальшому може бути вловлена. За енерговитратами ця схема аналогічна попередній.

4.3. Конструкції пиловловлювачів, розроблені окремими авторами в порядку зростання часу

На рис. 4.4 подана конструкція пиловловлювача, що працює наступним чином: запилений газ вводиться в корпус 1 через вхідний осьовий трубопровід 4, закручується лопатковим завихровувачем 5 і далі відтісняється корпусним обтікачем 7 до стінок корпусу 1, зберігаючи обертовий рух. Вихор запиленого газу біля стінок корпусу 1 піднімається вгору.

У сопло 3, розташоване у верхній частині корпусу 1, подається вторинний газовловлювач. Потім його закручує потік запиленого газу в той же бік, що й завихровувач 5. Під дією відцентрових сил частинки пилу з внутрішнього первинного вихору переміщуються до межі потоків первинного запиленого газу й вторинного газовловлювача. Тут радіальна складова швидкості частинок падає до нуля, і вони на межі двох вихрових потоків переміщаються в бік осьової складової газовловлювача, тобто в бункер 9.

Вторинний газовловлювач у ході спірального обтікання вихрового потоку очищеного газу поступово проникає в нього й вони обидва виходять з обладнання через діафрагму 2. Частина вторинного газовловлювача потрапляє в бункер 9, а потім через трубку 6 і регулятор 10 розходу відсмоктуючого газу потрапляє на допоміжний завихровувач 8, що закручує потік відсмоктуючого запиленого газу з бункера 9 у той же бік, що й основний завихровувач, і забезпечує подачу пилу в основний первинний потік газу. Конус-обтікач 7 призначений для притискання основного потоку запиленого газу до стінок корпусу 1. Швидкість газу на виході з допоміжного завихровувача 8 може змінюватися як за рахунок регулятора 10, так і за рахунок зміни розмірів обтікача 12. Підпорна шайба 11 знижує винесення вловленої пилу з бункера за рахунок утворення перепаду тиску між робочою зоною обладнання та бункером 9.

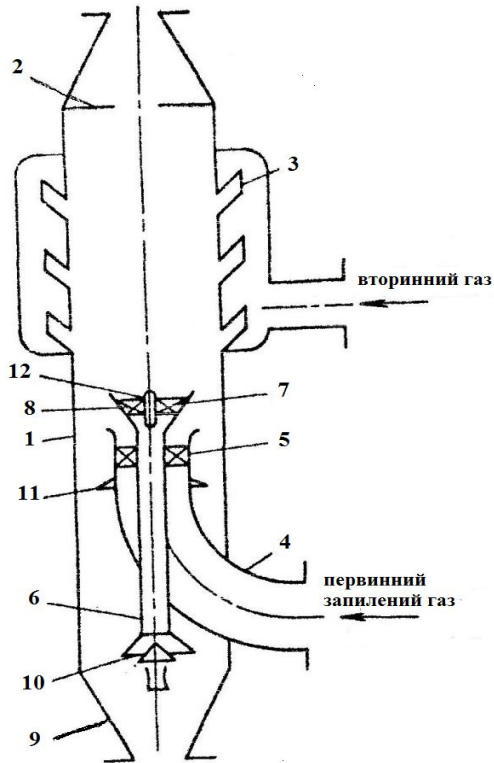


Рис. 4.4. Вихровий пиловловлювач із завихровувачем у вихідному кінці коаксіальної трубки: 1 – корпус; 2 – діафрагма; 3 – сопло; 4 – вхідна труба; 5 – завихровувач; 6 – трубка виходу; 7 – корпусний обтікач; 8 – завихровувач; 9 – бункер; 10 – регулятор; 11 – підпорна шайба; 12 – обтікач

Вихровий пиловловлювач зображено на рис. 4.5 [42]. Робота пиловловлювача здійснюється наступним чином: основний потік запиленого газу за рахунок розрідження, створеного в глушнику 17 основним вентилятором, подається в тангенційний патрубок 9 і, попередньо закручений, надходить у камеру 4. Далі газ по

спіралі надходить у порожнину 11, де проходить вирівнювання швидкостей у поперечних перетинах. Сформований таким чином газовий потік закручується лопатковим завихровувачем 2 і рухається вгору по камері 1, а очищений газ через вихідну трубу 17 виводиться з апарату.

Одночасно допоміжний газовий потік нагнітається в улітку 1 допоміжним вентилятором. З улітки 15 газ закручується по направляючій 16 і рухається вниз уздовж стінок камери 1 пиловловлювача й захоплює пил, виділений з основного газового потоку. Під час руху до бункера 13 газ рухається й переміщує пил через кільцеву порожнину 12. У бункері 13 пил накопичується і періодично виводиться за допомогою пилового затвору 14.

Зовнішнє повітря рухається за рахунок розрідження по осьовому корпусу 8 до завихровувача 2, а потім проходить очищення разом з основним потоком. Перевага даного апарата полягає в тому, що зменшуються розміри, а також підвищується надійність його роботи і ступінь очищення газу.

На рис. 4.6 [43] зображено вихровий пиловловлювач, в якому запилений газ надходить по тангенціальному патрубку 2 у кільцевий простір між корпусом 1 і патрубком 3. У кільцевому зазорі газ закручується і, обертаючись у вигляді кільцевого вихору, опускається в нижню частину корпусу 1. Частинки пилу під дією відцентрової сили рухаються до стінки корпусу 1, де сповзають у конічне днище 6 і далі в пилозбірник.

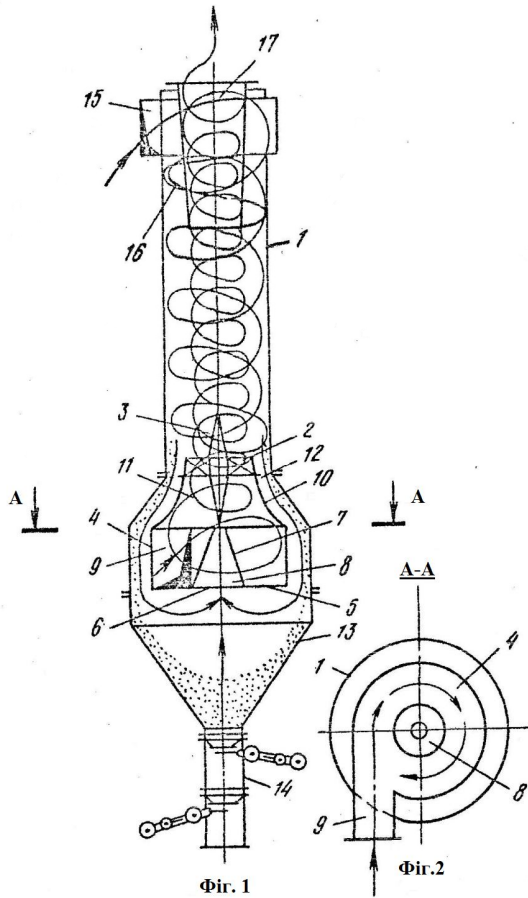


Рис. 4.5. Вихровий пилов-ловлювач з основним потоком у приосьовому завихровувачі й допо-міжним периферійним потоком: 1 – корпус; 2 – завихровувач; 3 – обтікач; 4 – камера; 5 – дно; 6 – конус; 7 – осьовий корпус; 8 – осьовий конус; 9 – тангенціальний патрубок; 10 – циліндрично-конічна стінка; 11 – порожнина; 12 – кільцева порожнина; 13 – бункер; 14 – пиловий затвір; 15 – равликовий завихровувач; 16 – гвинтова направляюча; 17 – вихідна труба

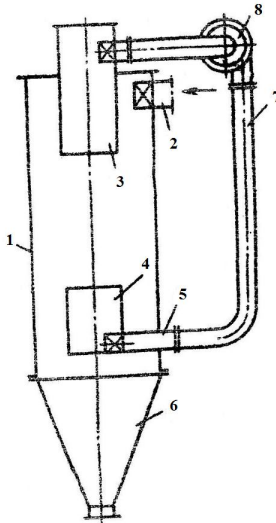
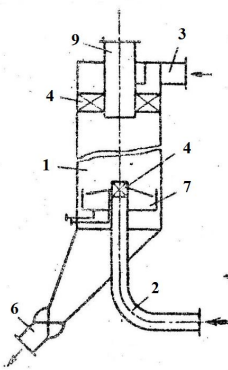


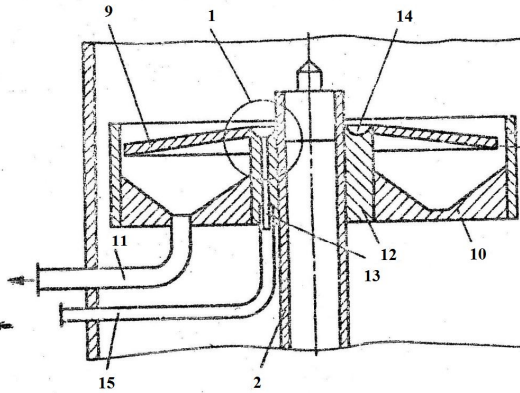
Рис. 4.6. Вихровий пиловловлювач із перепускною лінією, з'єднаною з осевим вводом: 1 – корпус; 2 – вихід вторинного газу; 3 – вихідний патрубок; 4 – патрубок первинного газу; 5 – завихровувач первинного потоку; 6 – бункер; 7 – перепускна лінія; 8 – вентилятор

Очищений газ, що продовжує обертатися, потрапляє в патрубок 3, з якого периферійна частина газу з утриманими невловленими частинками захоплюється у всмоктуючий патрубок вентилятора 8, з'єднаний тангенціально з патрубком 3. Вентилятор 8 нагнітає газ через лінію 2 в патрубок 5 в осьову частину корпусу, де, обертаючись із великою швидкістю, у центральній частині корпусу 1 із нього виділяються залишені тверді частинки, одночасно передаючи допоміжну енергію обертання запиленому газовому потоку. Далі центральний вихор, що обертається, змішується з кільцевим потоком газу після очищення і направляється в патрубок 3.

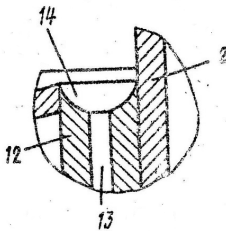
У пиловловлювачі, зображеному на рис. 4.7 [44], подано апарат для теплової обробки дисперсних матеріалів у зустрічних закручених потоках.



Фігура 1



Фігура 2



Фігура 3

Рис. 4.7. Апарат із зустрічними закрученими потоками для теплової обробки дисперсних матеріалів: 1 – камера; 2 – трубопровід первинного потоку; 3 – патрубок вторинного потоку; 4 – завихровувачі; 5 – патрубок очищеного газу; 6 – патрубок виводу частинок; 7 – відбійна шайба; 8 – обичайка; 9,10 – фланці; 11 – патрубок; 12 – втулка; 13 – канал, наскрізний канал; 14 – кільце заглиблення

Він складається із циліндричної камери 1 із трубопроводами 2 та 3 вводу зустрічних закручених потоків і завихровувача 4. Патрубки 5 і 6 служать для виводу відробленого газу й висушеного або відловленого матеріалу з об'єму апарата, а відбійна шайба 7, що

установлена на трубопроводі 2 – вводу первинного потоку, наприклад, з можливістю переміщення на різьбі.

Відбійна шайба 7 зроблена у вигляді циліндричної обічайки 8 з верхнім 9 і нижнім 10 фланцями. У нижньому фланці 10 виконаний наскрізний отвір, в який встановлено патрубок 11 для відводу рідини з частинками матеріалу у зливну систему. На трубопроводі 2 із середини шайби 7 встановлена втулка 12, в якій зроблено наскрізний канал 13, що з'єднується з кільцевим заглибленням 14 на її верхньому торці й патрубок 15 підводу рідини. Фланець шайби 7 виконано у вигляді підсічного конуса, оберненого більшою основою вниз із кутом нахилу $5-15^{\circ}$, фланець 9 утворює кільцевий отвір 16 з боковою поверхнею шайби 7.

Вихровий пиловловлювач, зображений на рис. 4.8, працює наступним чином [45]: запилений газовий потік подається через осьовий ввід 4, де він проходить тангенційний завихровувач 6 і закручується, а далі надходить до циліндричного корпусу 1. Газовий потік, що надходить через тангенціальний патрубок 3, утворює зовнішній пристіночний потік, направлений униз, назустріч внутрішньому потоку.

Із внутрішнього потоку частинки пилу під дією відцентрової сили переміщуються у внутрішній потік і рухаються в нижню частину апарата, при цьому газ із зовнішнього потоку в нижній частині апарата відбивається від відбійної шайби 5, переходить у внутрішній потік і видаляється в пилозбірник 9. З метою усунення можливості затримки пилу на допоміжній шайбі нахили відбійної та допоміжної шайб однакові. Якщо нахил допоміжної шайби менший, то більший нахил відбійної шайби при збереженні співвідношення діаметрів утворює той же ефект, що і в припущеному пиловловлювачі, однак призводить до зростання маси шайби.

Частинки пилу за рахунок відцентрової сили з вихідного потоку переміщуються в пристінну зону апарата.

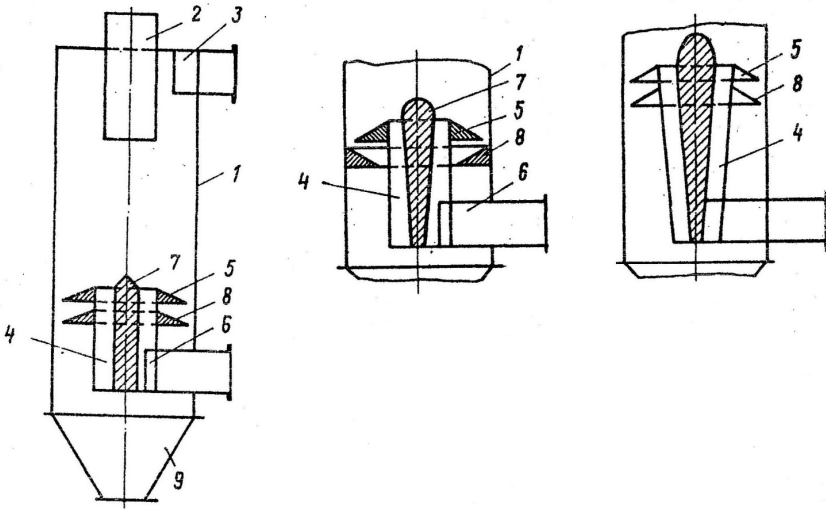


Рис. 4.8. Вихровий пиловловлювач із відбійною допоміжною шайбою: 1 – корпус; 2 – вихідний патрубок; 3 – патрубок входу вторинного потоку; 4 – осьовий вхід; 5 – відбійна шайба; 6 – завихровувач; 7 – обтічник; 8 – допоміжна шайба; 9 – пилозбірник

При цьому діюча на частинки сила пропорційна масі частинки, отже великі частинки швидше досягають пристінної зони і, взаємодіючи з нисхідним потоком, уловлюються, а маленькі частинки (менші за 10 мкм), обертаючись у центральній зоні, захоплюються висхідним центральним потоком і разом з ним викидаються через патрубок 2 в атмосферу. Для запобігання цього явища необхідно утворити конічну, розширену вгору форму висхідного запиленого газового потоку, що дозволяє переміщати в пристінну зону як великі, так і маленькі частинки. Конічна форма запиленого газового потоку утворюється конічною формою обтічника й осьового вводу та куполоподібною частиною верхнього обтічника. Наявність допоміжної шайби, закріпленої на осьовому

вводі або циліндричному корпусі, дозволяє утворити допоміжний затвор на шляху виносу дрібних частинок з пилозбірника потоком газу, що потрапляє в бункер із частинками й газом. Тим самим наявність допоміжної шайби дозволяє збільшити ефективність роботи пиловловлювача.

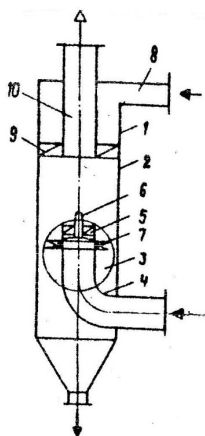
Вихровий пиловловлювач, що зображений на рис. 4.9 [46], призначений для вловлювання частинок з малою густиною. У ньому пластини відбійної шайби мають гвинтову лінію, а найбільш відбійна шайба має можливість обертання.

Порядок роботи вловлювача наступний:

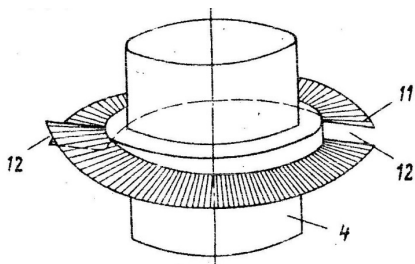
Запилений газ може надходити по центральному газоходу або по двох каналах одночасно, тобто по газоходу 4 і по патрубку вторинного потоку 8. Запилений потік, що надходить до апарату по газопроводу 4, закручується завихровувачем 5. Для усунення осьових потоків уздовж корпусу використаний обтічник 6, що також сприяє формуванню вихору. Під дією відцентрових сил у сепараційній частині 2 камери 1 частинки пилу переміщуються до стінок, де потрапляють у зону обертання вторинного потоку газу, що вводиться в апарат через патрубок 8 та закрученим завихровувачем 9. Вторинний потік рухається в осьовому напрямку, протилежному напрямку первинного потоку, однак обидва потоки закручені в одному напрямку. Досягаючи шайби, потік ударяється об її поверхню, розвертається в протилежному напрямку і, об'єднуючись із висхідним потоком, виходить з апарата через патрубок 10.

Частина потоку проходить щільові канали 12 і, ударяючись по внутрішній поверхні пластини 11, надає шайбі обертальний рух. При цьому ударі також виникає відділення частинок від потоку. Таким чином, робочими частинами пластин забезпечується відділення частин пилу від потоку газу.

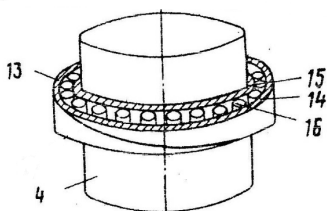
Під час удару потоку об зовнішню поверхню шайби 7 частинки пилу по інерції проходять у післясепараційну частину камери 3 через кільцевий зазор між відбійною шайбою 7 і корпусом апарату 1. При цьому обертальний рух шайби дозволяє повністю виключити явище забивання кільцевого зазору. Це виникає тому, що обертальний рух шайби 7 при конструктивному виготовленні пластин 11 указаним способом забезпечує постійне поступове переміщення матеріалу в післясепараційну частину 3 камери.



Фігура 1



Фігура 2



Фігура 3

Рис. 4.9. Вихровий пиловловлювач із гвинтовою відбійною шайбою: 1 – камера; 2 – сепараційна частина; 3 – післясепараційна частина; 4 – газопровід; 5,9 – завихровувач; 6 – обтічник; 7 – відбійна шайба; 8 – патрубок вторинного потоку; 10 – вихлопна труба; 11 – пластина; 12 – щільові канали; 13 – кільцева обійма; 14,15 – зовнішні і внутрішні кільця; 16 – ролики

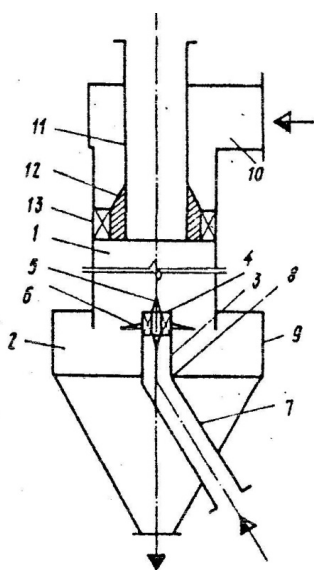
Частинки, що потрапляють в нижню частину апарата, піддаються допоміжному розділенню, оскільки в зоні камери 3 утворюється допоміжний закручений потік, що переміщує частинки до стінок, зменшуючи тим самим вторинний виніс.

Таким чином, використання пластин відбійної шайби, зігнутої по висхідній гвинтовій лінії з утворенням щільних каналів між вихідною і висхідною частинами сусідніх пластин, дозволяє не просто змінити напрямок периферійного потоку та виділити з нього частинки пилу, а й забезпечити обертальний рух самої шайби під дією обертаючого потоку в сепараційній камері. Обертальний рух шайби і її будова дозволяють повністю виключити явище забивання кільцевого зазору незалежно від якості вловленого матеріалу. До того ж, обертання шайби забезпечує допоміжне крутіння потоку, що знаходиться в післясепараційній зоні камери, тобто в нижній частині апарату, що підвищує ступінь очищення газу і знижує вторинний виніс. На фрагменті 2 зображена відбійна шайба, на фрагменті 3 – закріплення відбійної шайби на центральному газопроводі, де показано наступне: пластини 11 відбійної шайби закріплені на кільцевій обіймі 1, між ними утворюються щільові канали 12. В окремому випадку кільцева обійма 13 може бути подана у вигляді роликового підшипника, що включає зовнішнє 14 і внутрішнє 15 кільця, а також ролики 16 по лінії кріплення пластинок до газоходу.

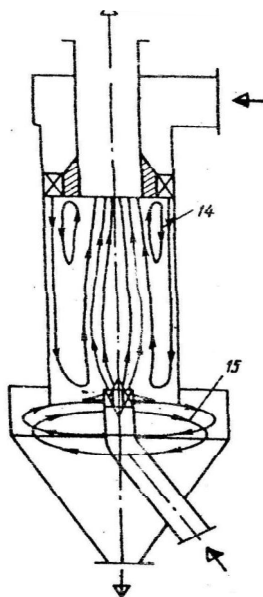
На рис. 4.10 [47] зображено вихровий пиловловлювач, в якому для підвищення ефективності пиловловлювання підвідна труба встановлена з нахилом $147,5^{\circ}$ до центрального вводу.

Вихровий пиловловлювач (рис. 4.10) працює наступним чином: запилений газ може входити в апарат по центральному патрубку вводу 3 або через тангенціальний ввід 10 у вигляді периферійного потоку, а також по двох вводах одночасно.

Поступаючи в апарат по центральному патрубку вводу 3, запилений потік, завдяки наявності коліна з кутом нахилу $147,5^{\circ}$, має упорядкований по площі перетин вводу 3 розподіл частинок пилу, що сприяє утворенню рівномірного пилонасичення вихрового факелу газового потоку, утвореного завихровувачем 4. Для усунення осьових потоків уздовж корпусу встановлений обтічник 5, що сприяє формуванню вихора. Під дією відцентрових сил у корпусі 1 частинки пилу переміщуються до стінок, де потрапляють у зону обертання периферійного потоку газу, який надходить в апарат через тангенціальний вхід 10. Далі закручений периферійний потік, пройшовши між конічною частиною вставки 12 і корпусом 1, стискається і через завихровувач 13 надходить у сепараційну частину корпусу 1.



Фігура 1



Фігура 2

Рис. 4.10. Вихровий пиловловлювач із підвідно-нахиленою трубою: 1 – корпус; 2 – циліндрична частина;

3 – центральний патрубок вводу; 4 – завихровувач;
5 – обтічник; 6 – шайба; 7 – патрубок; 8 – нижній
вхід патрубка; 9 – циліндрична частина; 10 –
тангенціальний вхід; 11 – патрубок; 12 – конічна частина
вставки; 13 – завихрювач; 14 – зона циркуляції; 15 –
закручена течія

Рівномірно організований периферійний потік рухається в осьовому напрямку, протилежному напрямку центрального потоку. При цьому обидва потоки закручені в одному напрямку. Досягнувши шайби 6, потік розвертається в іншому напрямку, об'єднується із висхідним потоком і залишає апарат по патрубку 11. При цьому вихідний потік випробовує вплив зони 14 циркуляції, під дією якої здійснюється його доочищення. Частина потоку проходить у простір пилозбірної камери, утворює закручену течію 15 у циліндричній частині 9 пилозбірної камери. У результаті цього виникає практично повна сепарація пилу в пилозбірній камері, оскільки закручений потік переміщує частинки до стінок, зменшуючи вторинний виніс. Утворення широкої зони 15 закрученого потоку можливе завдяки встановленому патрубку 3 входу центрального потоку із зігнутою ділянкою 8, що установлена нижче циліндричної частини 4 пилозбірної камери.

Конструкція входів периферійного і центрального потоків дозволяє реалізувати в апараті режим течії, показаний на фігурі 2, що є найбільш прийнятним з точки зору ефективності пиловловлювання, причому витрати периферійного потоку не перевищують витрат газу через центральний вхід, а загальна витрата підвищує питомі енерговитрати.

Така конструкція входів дозволяє здійснити попередню обробку запилених потоків до входу в сепараційну камеру, тобто покращити умови подачі матеріалу. Цим зумовлене підвищення ефективності

очищення газів до 98-99% при одночасному зниженні в 1,5-2 рази питомих енерговитрат.

На рис. 4.11 зображений вихровий пиловловлювач [48], в якому закручувальний пристрій вторинного потоку виготовлений у вигляді завитка, має регулюючий пристрій, а в нижній частині пиловловлювача розташований прибиральний пристрій у вигляді транспортера.

Пристрій працює таким чином: у газопровід 2 циліндричного корпусу 1 під робочим тиском технологічної системи подається забруднений газ. За допомогою гвинтового завихровувача 3 потік газу закручується й рухається догори.

У верхній частині апарата уліточним завихровувачем 5 подається вторинний потік газу, що рухається вниз. У забрудненому потоці газу під дією відцентрових сил частинки пилу спрямовуються на його периферію, а звідти – у спіральний потік вторинного газу, що направляє їх донизу для опускання на дно апарата. Вторинний газ у вході спірального обтікання потоку газу, що очищається, послідовно проникає в нього і «затухає», переходячи в центральну частину апарата, де знаходиться очищений газ. Застосування саме цієї конструкції дозволяє використовувати пристрій для очищення газу від дрібного залипаючого пилу різної концентрації.

В залежності від фізико-хімічних властивостей, концентрації та дисперсності пилу розмір відбійної шайби 4 може бути різним. Відбійна шайба не допускає повторного виносу вловленого пилу та забезпечує безповоротне опускання його в бункер. Конструкція направляючої лопатки 7 дозволяє здійснювати регулювання входу газу в корпус апарата в залежності від властивостей дисперсного пилу, концентрації його в газі та необхідного відношення витрат первинного і вторинного потоків.

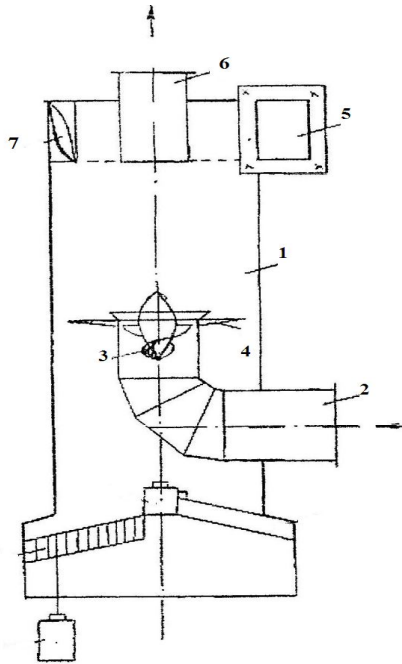


Рис. 4.11. Вихровий пиловловлювач із закрученим у вигляді завитка регулятором: 1 – корпус; 2 – газопровід; 3 – гвинтовий завихровувач; 4 – відбійна шайба; 5 – уліточний завихровувач; 6 – вихлопна труба; 7 – направляюча лопатка

За допомогою направляючої лопатки можливе періодичне очищення внутрішньої поверхні входу газу у випадку налипання пилю. Під час установа вихрового пиловловлювача проводиться коліровка регулюючої лопатки в залежності від того, що буде використовуватися в якості вторинного потоку – чистий чи забруднений газ. Використання чистого газу (повітря) можливе при необхідності додаткового охолодження газів, що відходять шляхом розрідження їх вторинним повітрям з подальшою очисткою.

Використання забрудненого потоку вигідно з економічної точки зору і рекомендується до використання під час очищення газу від залипаючого, схильного до коагуляції пилу різної концентрації. Ефективність сепарації дрібного пилу в цьому випадку зростає завдяки тому, що частинки пилу у вторинному потоці стикаються з частинками первинного забрудненого газу. При цьому вони коагулюють, зростають і відкидаються до стінок апарату. Імовірність очищення газу від великих частинок збільшує ефективність сепарації пилу, підвищуючи ефективність очистки.

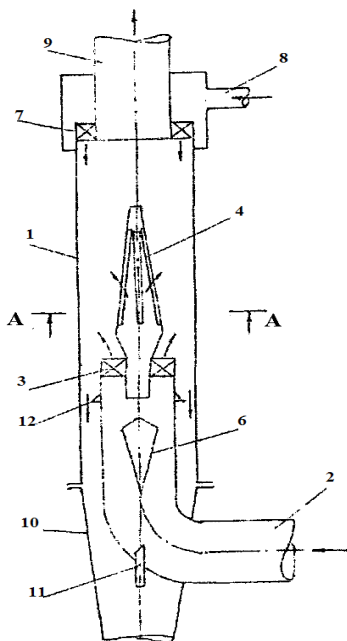
Для зберігання структури якості вловленого пилу (повторне використання у виробництві або як готової продукції) скребок прибирального механізму виготовляється зі стійкого полімерного матеріалу, що не вступає в реакцію з уловленим пилом.

На рис. 4.12 зображено вихровий пиловловлювач, який відрізняється тим, що у трубопроводі подачі запиленого газу перед лопатковим завихровувачем установлений профільований центральний обтічник, а в центральній частині вихідного перетину трубопроводу подачі встановлений порожнистий направляючий конус із циліндричною нижньою частиною та зі щільними соплами на його бічній поверхні [49].

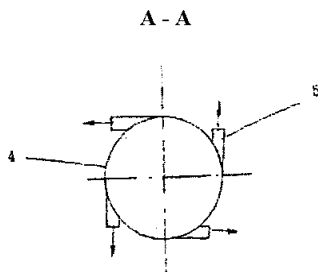
Пиловловлювач працює таким чином: у робочу частину циліндричного корпусу 1 по трубопроводу 2 подають запилене повітря. Під час руху потоку через трубопровід 2 та обтікач 6 значна частина твердих частинок зміщується до периферії прохідного каналу. Внаслідок цього газ, що очищається, подається до робочої частини пиловловлювача за двома напрямками з різними ступенями запилення: більш концентрований пиловий потік подається через лопатковий завихровувач 3 до периферійної частини порожнини циліндричного корпусу, а з центральної частини трубопроводу слабозапилений потік газу надходить через внутрішню порожнину

направляючого конусу 4 та щілину сопла 5 до центральної частини робочого каналу пиловловлювача.

Проходячи через лопатковий завихрювач 3, концентрований пиловий потік закручується й при натіканні на нижню частину направляючого корпусу 4 з ділянкою зворотної конусності відкидається до стінки циліндричного корпусу 1. Під дією відцентрових сил пил концентрується в периферійних шарах основного потоку і вторинним потоком газу, що подається через лопатковий завихрювач 7, уноситься до бункера 10. Очищений потік із центральної частини трубопроводу подачі проходить через внутрішню порожнину направляючого конусу 4 і надходить через щілинні сопла 5 до центральної зони робочої ділянки пиловловлювача. Внаслідок тангенціального розташування щілинних сопел 5 повітря закручується в тому ж напрямку, що й основний потік.



Фігура 1



Фігура 2

Рис. 4.12. Вихровий пиловловлювач із профільованим центральним обтічником перед лопатковим завихровувачем: 1 – корпус; 2 – трубопровід; 3 – завихровувач; 4 – направляючий конус; 5 – щілина сопла; 6 – обтікач; 7 – лопатковий завихровувач; 8 – патрубков; 9 – вихлопна труба; 10 – бункер; 11 – трубка; 12 – підпірна шайба

У залежності від просування даного потоку до вихідного трубопроводу за рахунок відцентрових сил відбувається радіальне переміщення часток пилу до стінок корпусу 1 у зону зворотної течії вторинного потоку. Направляючий конус також стабілізує вихрову структуру в ядрі вертикального потоку, запобігаючи створенню зворотного осьового вихору. Частинки пилу осідають у бункері 10, а повітря через трубку 11 опускається в трубопровід подачі 2. Запобігання викидів пилу з бункера 10 у робочу частину пиловловлювача забезпечується підпірною шайбою 12.

На рис. 4.13 зображено вихровий пиловловлювач [50], який має завихровувач потоку у вигляді двох оболонок, що утворюють отвір для входу закрученого потоку в осьову зону газу, а внутрішня кришка закінчується обтікачем.

Для цілеспрямованого вводу первинного закрученого потоку повітря у внутрішню приосьову частину корпусу 1, використовують завихрювач 3, який складається із плаского дна шайби 7, зовнішньої 8 і внутрішньої 9 циліндричних оболонок, які у верхній частині мають конічні оболонки 10 та 11, витискувач потоку 12, який має конічне розширення донизу. Між витискувачем і конічними оболонками утворюється кільцевий отвір 13, для виходу запиленого первинного закрученого потоку.

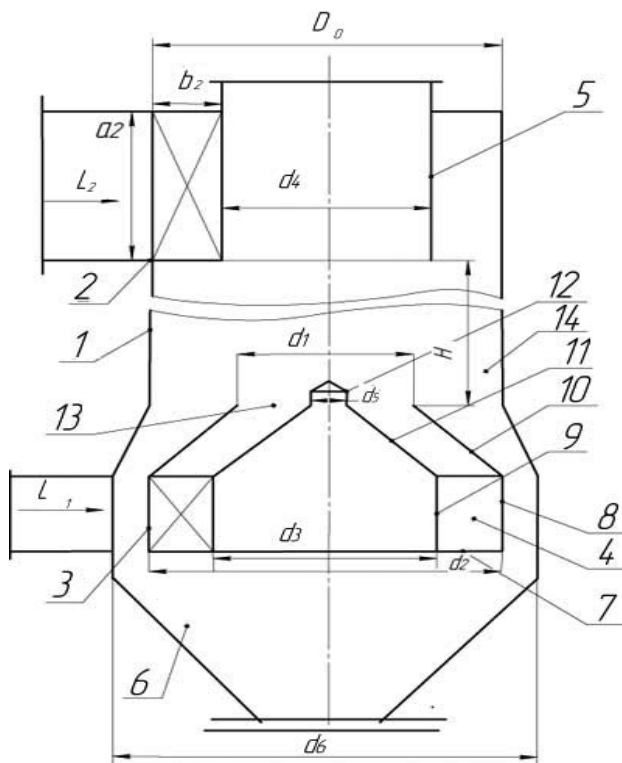


Рис. 4.13. Вихровий пиловловлювач з осьовим завихрювачем у вигляді двох оболонок для входу закрученого потоку між ними [50].

Між шайбою та корпусом пиловловлювача існує отвір для спуску продукту 14, що дозволяє значно інтенсифікувати процес розділення потоку на пилогазовий потік і відокремлений вторинний потік повітря з залишками частинок в місці повороту вторинного повітря з верху донизу на рух догори.

Принцип дії даної конструкції вдосконаленого пиловловлювача полягає в обґрунтованій фізичній моделі руху повітря: запилене повітря може потрапляти до корпусу одночасно по центральному приосьовому вводу 3 із завихрювачем 4 та тангенційному або уліточному

зовнішньому вході 2 повітряного потоку. Вторинний потік, який подається через завихрювач 2, рухається з верхньої частини корпусу 1 вниз. В процесі руху він поступово змішується з приосьовим потоком, який рухається знизу догори через завихрювач 4, між двома конічними оболонками 8 та 9.

Піднімаючись догори, нижній приосьовий потік поступово змішується з зовнішнім і вони виходять у вихідну трубу 5. У забрудненому потоці повітря, що обертається, під дією відцентрових сил, зважені частинки продукту спрямовуються на його периферію, а звідти, разом з вторинним потоком, опускаються біля стінок вниз до конічної оболонки 10 і по отвору 14, між корпусом пиловловлювача і оболонкою 8, зсипаються в конічний бункер 6 і далі в тару.

Будова вихрового пиловловлювача має вигляд приосьового завихрювача з відносним зовнішнім і внутрішнім діаметром $d_1 = 0,9 \div 0,6 d_0$ і $d_2 = 0,5 \div 0,6 d_0$ при відношенні височин вхідних патрубків $h_2 : h_1 = 2:1$ та однакової їх ширині b , з розширенням корпусу пиловловлювача в нижній частині до $d_{10} = 1,2$, причому, в осьовому пиловловлювачі вставлена циліндрична оболонка. Ззовні циліндричні оболонки виготовлені з конічними кришками, між якими знаходиться отвір 13 для виходу запиленого первинного закрученого потоку й зсипанню пилу 16, що дозволяє значно інтенсифікувати процес розділення потоку на пилогазовий та відокремлений вторинний із залишками частинок у місці повороту вторинного потоку газу з руху донизу на рух догори. За рахунок таких співвідношень також інтенсифікується обертання газу, досягається співвідношення моменту кількості руху $M_2 : M_1$, рівного співвідношення витрат $L_2 : L_1$ як у внутрішній приосьовій частині, так і в зовнішній. Це підвищує рівень відцентрових сил та ефективність пиловловлювання.

Порівняльні експериментальні дослідження проводилися на лабораторній установці діаметром 100 мм і показали перевагу корисної моделі перед існуючими апаратами. Але при пиловловлюванні мало місце пропускання пилу на поверхні в нижній частині апарата.

У вихровому пиловловлювачі, розробленому в Запорізькій державній інженерній академії [51] та, зображеному на рис. 4.14, запилене повітря (газ) надходить через трубу Вентурі 9 у патрубок входу повітря (газу) 4 і далі тангенціально в одну із перфорованих камер 2. У результаті дії відцентрових сил пил, відкинутий на стінки камери, із часткою газу через отвори 12 у стінці перфорованої камери надходить у пилозбірну камеру 13, утворену корпусом 1 та перфорованими камерами 2, де зсипається в бункер для збору пилу 3.

Рух закрученого потоку здійснюється зверху вниз. Очищений газ через вихідну трубу 5 надходить у завиток 6, після чого виводиться із пиловловлювача через вихідний патрубок 7. Пил, що осів на стінках нижньої перфорованої камери з деякою кількістю газу, через конічну камеру 10 надходить у камеру 11, де потік сповільнюється й надходить у бункер 3 для збору пилу, а далі по центральній трубі 8 направляється в трубу Вентурі 9, де змішується з вхідним потоком у пиловловлювачі й проходить повторне очищення.

У пиловловлювачі первинне віднесення пилу ліквідується тим, що по осі корпусу розміщені перфоровані циліндричні камери різного діаметру, кількість яких залежить від дисперсного складу пилу, що вловлюється. Розташовуються камери східчато. Для того, щоб рециркуляція газу здійснювалася з бункера на вхід у пиловловлювач, а не навпаки, співвідношення площі мінімального прохідного перетину труби Вентурі й площі вхідного патрубка повинно бути меншим за $1,7 \cdot \varepsilon^{\frac{1}{2}}$, де ε – коефіцієнт опору пиловловлювача, віднесений до

швидкості входу газу у внутрішню камеру. При такій конструкції пиловловлювача пил, відкинутий на стінки перфорованих камер, через отвори проникає в порожнину, утворену перфорованими камерами й корпусом пиловловлювача, що виключає можливість потрапляння її у внутрішній вихор. За рахунок наявності перепускної труби, що забезпечує рециркуляцію газу з пилом, що потрапили в бункер, ліквідується вторинне віднесення пилу з пиловловлювача, тобто пил із бункера не потрапляє в потік газу, який видаляється з пиловловлювача. Для того, щоб пил, вилучений із нижньої перфорованої камери при русі її до бункера, не нісся внутрішнім вихором у вихідну трубу, під нижньою перфорованою камерою встановлюється конічна камера – розподільник потоку.

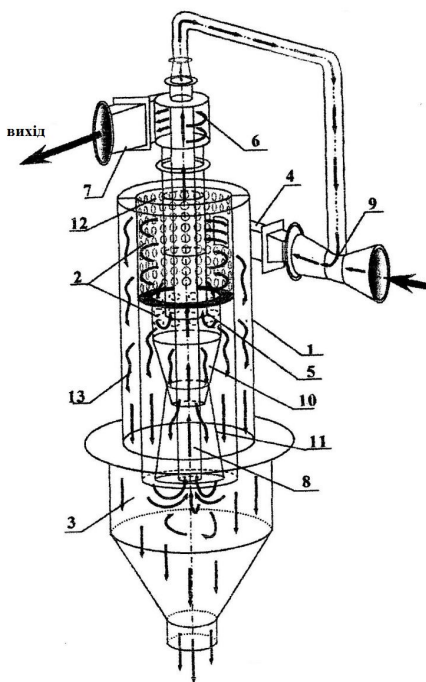


Рис. 4.14. Вихровий пиловловлювач Запорізької державної інженерної академії [51]

Потік пилу з газом, що входить у бункер, може досягти великої швидкості, внаслідок чого пил, що осів у бункері, буде перемішуватися з газом і в перепускнну трубу потрапить занадто велика кількість пилу. Щоб цього не сталося, у нижній частині пиловловлювача встановлюється друга камера у вигляді зрізаного конуса, широка частина якої розміщена в бункері, а вузька – з'єднана з розподільником потоку. За рахунок розширення камери швидкість потоку пилу з повітрям (газом) знизиться перед потраплянням у бункер.

Пиловловлювач, зображений на рис. 4.15, має горизонтальний корпус [52] та штуцери для подачі теплоносія і може бути використаний у харчовій та хімічній промисловості, наприклад, у виробництві органічно-мінеральних добрив.

Пиловловлювач має горизонтальний циліндричний корпус 1, тангенціально приєднаний штуцер 2 для введення запиленого повітря I, співвісний патрубок 3 із завихривачем 4 для введення додаткового повітря II, штуцер 5 для відведення пилу IV та співвісний патрубок 6 із відбійником 7 для виведення очищеного повітря III.

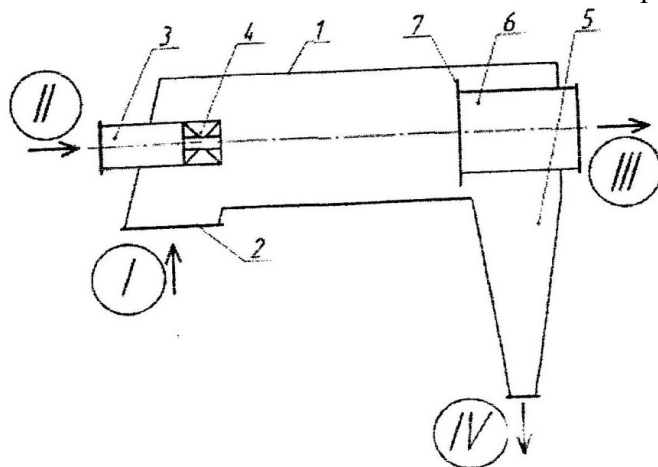


Рис. 4.15. Пиловловлювач.

Пиловлловлювач працює таким чином: запилене повітря тангенціально подається в корпус пиловловлювача 1, за рахунок чого має обертовий рух. Додаткове повітря на вході в корпус закручується завихровувачем 4 та створює в корпусі додаткове обертання осьового потоку запиленого повітря. За рахунок відцентрових сил в центральній частині створюється потік очищеного від пилу повітря, що відводиться з корпусу через патрубок 6. Пил вивантажується через штуцер 5.

4.4. Патенти закордонних винахідників

Патент закордонних винахідників під назвою «Пиловлловлювач» [54] відноситься до пристроїв для очищення газів із використанням вихрових потоків і може бути використаний у різних галузях народного господарства. Суть винаходу полягає в тому, що, на відміну від відомих пиловловлювачів, які утримують корпус із вихровою камерою, бункер, завихровувач і обладнання для введення запиленого газу в глушник, являють собою камеру чистого газу. Вихрову камеру виготовлено у вигляді двох напівциліндрів, зміщених відносно один одного у двох взаємно перпендикулярних площинах. Центри радіусів пилоциліндричних поверхонь зміщені відносно повздовжньої осі в напрямку обертання газового потоку й оснащені повздовжніми карманами. Завихровувач виготовлений у формі відсіченого конуса з осьовим наскрізним отвором та оснащений гвинтовими лопатями по зовнішній площині, що розташовані від вершини до основи по ходу обертання газового потоку, а кут нахилу лопатей до продольної осі пиловловлювача складає $20-45^{\circ}$. Завихровувач з'єднаний з нижнім кінцем вихідної труби й утворює ізольовану камеру чистого газу.

Виготовлення завихровувача у формі відсіченого конуса, оснащеного по зовнішній площині гвинтовими

лопатами, що розташовані до основи ходу обертання газового потоку з кутом нахилу до повздовжньої осі пиловловлювача 20-45⁰, утворює допоміжний вихровий імпульс та забезпечує виведення дрібнодисперсної фракції частинок із центральної зони вихрової камери. З'єднання завихровувача з вихідною трубою дозволяє ізолювати потік чистого газу від потоку запиленого газу й гарантує запобігання викидів в атмосферу твердих частинок, що дозволяє досягти поставленої мети.

Використання цього вихрового пиловловлювача, у порівнянні з прототипами, дозволяє скоротити час очищення газів, тобто підвищити продуктивність пиловловлювача. Ізолювання камер запиленого та чистого газів запобігає викиду твердих частинок в атмосферу, тобто підвищує ступінь очищення газу.

У патенті закордонних винахідників [55] під назвою «Вихровий пиловловлювач для очищення газів» передбачається для підвищення економічності й розширення функціональних можливостей з очищення газів, наприклад, для димових газів ТЕЦ. Очищення газів відбувається завдяки тому, що вихровий пиловловлювач для очищення гарячих газів виготовлений у формі циліндричного корпусу з розміщеною внизу пилозбірною камерою, а газохід підводу гарячого запиленого газу з'єднаний із нижнім осьовим входом корпусу. У верхній частині корпусу периферійний вхід допоміжного закрученого потоку з'єднаний із трубопроводом подачі води. Верхній вивід очищеного газу, оснащений кожухом-теплообмінником, який охоплює осьовий вхід з утворенням кільцевого проточного каналу. Завихровувач установлений на виході осьового входу й кільцевого каналу. Система подачі води включає ємність із розміщеним на її вході сепаратором продувної води парового казана; трубопровід із насосом подачі води з ємності, розміщений у газоході підводу гарячого запиленого газу; підігрівач, з'єднаний трубопроводом із

кожухом-теплообмінником та периферійним вводом допоміжного закрученого потоку. У пиловловлювачі основний і допоміжний закручені потоки утворюються без використання газодувних засобів за рахунок утилізації тепла газів і води продувки казана, що й обумовлює підвищення економічності пиловловлювача. Для утворення вихрових потоків використовується нагріта пара, яку отримують із продувної води парових казанів за рахунок тепла газів, що очищаються.

Винахід [56] відноситься до обладнання для сухого очищення запиленого газу шляхом використання інерційних сил у закручених потоках і може бути використаний у будь-якій галузі техніки з очищення або вловлення пилових фракцій.

Конструктивно пиловловлювач (ВПВ) складається із циліндричної сепараційної камери, двох патрубків вводу газу для закручування потоку, патрубка виводу очищеного газу, відбійної шайби та пилового бункера.

Мета винаходу полягає в підвищенні ефективності очисного обладнання (пиловловлювача) за рахунок ліквідації паразитних вихрів у верхній зоні сепараційної камери.

Це досягається завдяки тому, що у верхній частині пиловловлювача стінки вихідного патрубка спряжені під кутом 90° із площинами розташування лопаткового завихровувача, що виготовляються в місцях спряження у вигляді обтікаючих площин, виконаних по профілю радіуса циліндра. Таке конструктивне рішення дозволило стабілізувати коло швидкостей і, отже, концентрації у верхній зоні пиловловлювача, тим самим зменшити виніс пилу з очищеним газом.

У вихровому пиловловлювачі [57] завихровувач допоміжного потоку виготовлений двоступеневим і прямоточним із кільцевим зазором між першою та другою сходинками закручення для проміжного викиду пилового концентрату й кільцевим зазором у нижній частині

завихровувача для утворення всмоктуючого потоку з пилозбірної камери. При цьому закручуючі елементи встановлені під різними кутами.

Технічна новизна винаходу – це зниження гідравлічного опору й підвищення ефективності пиловловлення за рахунок зміни конструкції завихровувача допоміжного потоку. Для цього пиловловлювач, який виготовлено двоступеневим із прямоточним кільцевим зазором між першою та другою ступенями закручення для проміжного викиду пилового концентрату й кільцевим зазором у нижній частині завихровувача для утворення підсосуємого потоку з пилозбірної камери, при цьому закручуючі елементи виконані під різними кутами.

У вихровому пиловловлювачі для очищення газу зважені частинки під дією центральної сили відкидаються на внутрішню поверхню апарата й осідають на ній.

Пиловловлювач складається із циліндричного корпусу з осьово-розташованими вихідними трубами, патрубком вводу вторинного потоку газу, пилозбірника, циліндрично-пропиленої вставки, що має лопатки, де вставка виготовлена у вигляді двох секцій, до того ж лопатки нижньої секції розташовані під позитивним кутом атаки до тангенціальної складової вектора швидкості вторинного (зовнішнього) потоку, а лопатки верхньої секції встановлені під негативним кутом до тангенціальної складової вектора швидкості вторинного потоку. Направляючі лопатки нижньої секції сприяють збільшенню окружної швидкості внутрішнього потоку. Направляючі верхньої секції утворюють ефект твердих частинок із периферійного внутрішнього потоку в зовнішній. Така конструкція вихрового пиловловлювача, на думку його авторів, дозволить забезпечити ефективно завихрування обох потоків газу, запобігти рикошету твердих частинок і виключити можливу появу допоміжних вихорів, що знижують аеродинаміку апарата.

У пиловловлювачі з вихроутворювачем [59] корпус має радіальний вхідний патрубок, вихідний патрубок у вигляді конуса, конічний пилозбірник, причому вихроутворювач має вигляд тангенціально скрученого в 1,5 витки листа, розміщеного в центрі завихривача, а вихідний патрубок має вигляд ковпака, що виступає всередину плоским зрізом зверху для видалення нальоту з пилу між ним і ковпаком та наступного їх зриву. Причому зріз – це сторона вписаного в патрубок рівностороннього трикутника.

4.5. Економічні аспекти пиловловлювання

Економічні показники пиловловлювачів розраховують для виявлення питомої річної вартості очищення, наприклад, на одиницю продуктивності системи по повітрю, а також витрат енергії, води та інших показників на очищення повітря. Наявність таких показників дозволяє більш обгрунтовано обирати оптимальний варіант обладнання очисних споруд.

Порівняльний техніко-економічний розрахунок проводять згідно з витратами з використанням формул [1, 3]:

$$E_n = (I_1 + E_n \cdot K_1) - (I_2 + E_n \cdot K_2), \quad (4.1)$$

де E_n – економічний ефект, який одержується як різниця приведених витрат по двох порівняльних системах; I_1 та I_2 – експлуатаційні витрати по порівняльних системах;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, який часто дорівнює 0,15; K_1 і K_2 – капітальні вкладення по порівняльних системах.

До капітальних вкладень відносяться витрати на придбання або виготовлення пиловловлювачів і вентиляторів, вартість приміщень, що використовуються з

урахуванням об'ємів та площ, а також вартість сукупних будівельних робіт.

Якщо використовуються мокрі пиловловлювачі, у капітальні витрати включається вартість обладнання для очищення стічних вод, вартість системи оборотного водопостачання, а також відповідних приміщень. Вартість обладнання, на яке відсутні затверджені кошторисні ціни, обчислюється за масою використаного металу та його ціни на одиницю відповідно до найближчого аналога.

При оцінці економічної системи необхідно враховувати не тільки вартісні показники обладнання (одноразові витрати), а й показники експлуатаційних витрат під час використання розглянутих установок.

Експлуатаційні витрати складаються із декількох елементів.

Витрати на змінні елементи фільтрів і пиловловлювачів. Вони беруться у відповідності до паспортних даних. Змінними вважаються елементи конструкції пиловловлювачів, строк амортизації яких менший, ніж пиловловлювачів загалом. До змінних елементів відносяться, в основному, фільтруючі матеріали та змочувальні повітряні фільтри, рукави, волокнисті прошарки вловлювачів туману.

Деякі показники на змінні фільтруючі матеріали й змочувачі фільтрів подані в таблиці 4.1.

Показники розраховані для початкової запиленості повітря 1 мг/м^3 , а при іншій запиленості вони повинні бути пропорційно змінені.

Витрати на електроенергію та воду. Витрати на електроенергію розраховують у відповідності до довідникових даних, що належать до району розташування об'єкта, який проектується, з урахуванням передбаченого часу введення об'єкта в експлуатацію. Витрати енергії у всмоктуючих і нагнітальних повітропроводах, які не враховують опір пиловловлюючого обладнання, приймають за паспортними даними.

Таблиця 4.1

**Витрати на змінні матеріали при очищенні
повітря в повітряних фільтрах**

| Фільтри | Витрати на очистку 100 тис. м ³ /год. При опорі фільтру | | |
|---|--|-------------------------------|-------------------------------|
| | Постійному 80-100 Па | Кінцевому | |
| | | 150 Па | 300 Па |
| Масляні самоочищувані Кд, Кт, ФШ зі змочувачем: нафтовими маслами: при одноразовому використанні при механічному вилученні шлама при регенерації мастила синтетичною рідиною ПМС 70%-ним водно- гліцериновим розчином | 1490 880 600 7050 2190 - | - - - - - 8620 | - - - - - 4550 |
| Рулонні ФРУ при питомому повітряному навантаженні на фільтруючий матеріал 8300 м ³ /(год·м ²) | - | 4800 | 2200 0 |
| Панельні ФР2 питомому повітряному навантаженні на фільтруючий матеріал 2500 м ³ /(год·м ²) | - | 4050 | - |
| Електричні ФЕ: зі скляно-волокнистими матами без противиносних матів опір (5-10 Па) | | | |

Вартість водопровідної води беруть за даними, що належать до району, в якому розташований об'єкт, що проектується. До вартості водопровідної води додається вартість послуг каналізаційних підприємств, враховуючи повний об'єм витраченої води.

Вартість водопровідної води в системах зворотнього водопостачання беруть за даними калькуляції собівартості об'єкта, що проектується. Для приблизних підрахунків можна брати вартість оборотної води на підприємствах інших галузей.

Витрати на заробітну плату персоналу, зайнятого заміною елементів, технаглядом, очищенням, дрібним і середнім ремонтом. Транспортні витрати на вивід уловленого матеріалу розраховують за ідентичними умовами й за віддаленістю об'єктів.

Амортизаційні відрахування беруть у вигляді вартості 4% від вартості обладнання. У тих випадках, коли вловлений матеріал має деяку цінність, пов'язану з його утилізацією, вартість відраховується від суми експлуатаційних витрат. Якщо після очищення повітря з'явиться можливість його повернення на рециркуляцію, визначається річна економія тепла (холоду) і його вартість відраховується від суми експлуатаційних витрат. Одночасно капітальні витрати зменшуються на величину витрат, що були необхідні для розширення потужності об'єктів.

РОЗДІЛ 5

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СУХИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

5.1. Розрахунок полів швидкостей у циліндричних апаратах із зустрічними закрученими потоками (ЗЗП)

У таких апаратах чітко розділяються вхідні потоки L_1 та L_2 . Геометричні параметри визначаються з їх значення. Схема апарату ЗЗП зображена на рис. 5.1.

Вторинний потік L_2 подається у верхню частину корпусу 1 апарата через завихровувач вторинного потоку 2 і, обертаючись у вигляді спіралі, опускається вздовж корпусу 1 до рівня відбійної шайби 3, пройшовши увесь шлях висоти сепараційного простору H . Первинний потік L_1 подається в нижню частину апарата через осьовий завихровувач 4, далі піднімається вгору й виходить через вихідну трубу 5 для подальшого очищення або в атмосферу. Можна вважати, що вторинний потік входить у первинний рівномірно й поступово з постійною швидкістю $V_{гх}$, на межі розділення потоків. Основні позначення: L_1 , L_2 , L_3 – витрати первинного, вторинного та об'єднаного потоків, $м^3 / с$; γ_0 , γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_x ,

r_y – радіус корпусу обтікання, завихровувача первинного потоку, завихровувача вторинного потоку, зони змішування потоків, вихідного патрубку відповідно, $м$; a , b – ширина та висота вхідного каналу відповідно, $м$.

Розглянувши окремо рух газу в кожній зоні, можна встановити значення складових швидкостей структури потоків у зоні сепарації.

Зовнішній шар. Різниця значень витрат на поточній висоті (z) та $(z + \Delta z)$ складатиме:

$$L_2(z + \Delta z) - L_2 = 2\pi r_x \Delta z |V_{rx}|, \quad (5.1)$$

$$V_{rx} = \frac{L_2}{2\pi r_x H}. \quad (5.2)$$

де z – висота, що відмірюється від верхнього рівня відбійної шайби до поточної точки, m .

У диференціальній формі рівняння (5.1) приводиться до наступного вигляду:

$$\frac{dL_2(z)}{dz} = 2\pi r_x \frac{L_2}{2\pi r_x H} = \frac{L_2}{H}. \quad (5.3)$$

Після інтегрування рівняння (5.3) має вигляд:

$$L_2(z) = \frac{L_2}{H} z + C_1;$$

граничні умови: $Z=0$; $L_2(z) = 0$; $C_1=0$.

Тоді:

$$L_2(z) = \frac{L_2}{H} z. \quad (5.4)$$

Другий підхід, коли розрахунок висоти проводиться зверху:

$$L_2(z) = L_2 - \frac{L_2}{H}(H - z) = L_2 \frac{z}{H}.$$

Внутрішній шар.

$$L_1(z + \Delta z) - L_1(z) = |V_{rx}| 2\pi r_x \Delta z.$$

У диференціальній формі: $\frac{dL_1}{dz} = 2\pi r_x \frac{L_2}{2\pi r_x H}.$

Після інтегрування: $L_1(z) = \frac{L_2}{H} z + C_1.$

Граничні умови: $z=H$; $C_1(z) = L_1 + L_2 = L_3$;

$$C_1 = L_3 - \frac{L_2}{H} H = L_1;$$

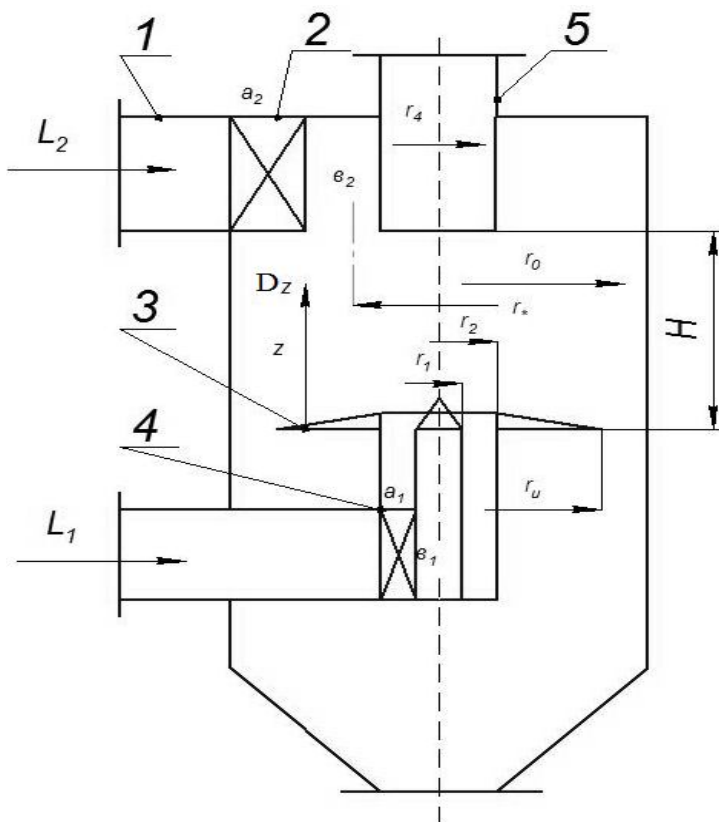


Рис. 5.1. Принципова схема апарату ЗЗП.

$$L_1(z) = L_1 + \frac{L_2}{H} z . \quad (5.5)$$

Осьові швидкості потоків визначаються за формулами :

$$V_{z2} = - \frac{L_2 z}{\pi H (r_0^2 - r_x^2)} r_0 > r > r_x , \quad (5.6)$$

$$V_{z1} = + \frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{\pi r_*^2} r_* > r > 0 . \quad (5.7)$$

Радіальні швидкості. Зовнішній шар.

Використаємо рівняння дивергенції в циліндричній системі координат (r, z) [69].

$$\frac{\partial(z \cdot \mathcal{G}_r)}{\partial r} + \frac{\partial(r \cdot \mathcal{G}_z)}{\partial z} + \frac{\partial \mathcal{G}_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \quad (5.8)$$

На кожній із орбіт з радіусом $r = const$, $\mathcal{G}_\varphi = const$,

або $\frac{\partial \mathcal{V}_\varphi}{\partial \varphi} = 0$.

Тоді $\frac{\partial(r \cdot \mathcal{G}_r)}{\partial r} = -\frac{\partial(r \cdot \mathcal{G}_z)}{\partial z}$.

У зв'язку з двомірністю потоку можна прийняти замість повільної ∂ постійну d .

Для зовнішнього шару: $\frac{d}{dz}(r \mathcal{G}_{r2}) = -r \left[\frac{d}{dz} \mathcal{G}_{zr} \right]$.

$$\frac{d}{dz}[\mathcal{G}_{z2}] = \frac{d}{dz} \left[-\frac{L_2 z}{\pi H (r_0^2 - r_*^2)} \right] = -\frac{L_2}{\pi H (r_0^2 - r_*^2)}$$

$$d(r \mathcal{G}_{r2}) = - \left[-\frac{L_2}{\pi H (r_0^2 - r_*^2)} \right] dr$$

Після інтегрування $r \mathcal{G}_{r2} = +\frac{L_2}{2\pi H (r_0^2 - r_*^2)} \frac{r^2}{2} + f_2(z)$.

Граничні умови: $r = r_0$; $\mathcal{G}_{r2} = 0$.

$$f_2(z) = -\frac{L_2 r_0^2}{\pi H (r_0^2 - r_*^2) 2}; \quad \mathcal{G}_{r2} = \frac{L_2 (2^2 - r_0^2)}{2\pi H (r_0^2 - r_*^2) r}$$

(5.9)

Для внутрішнього шару:

$$\frac{d}{dr}(r \mathcal{G}_{r1}) = -\frac{d}{dz} \left[r \frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{\pi r_*^2} \right],$$

$$\frac{d}{dr}(r\mathcal{G}_{r1}) = -\frac{r \frac{L_2}{H}}{\pi r_*^2} = -\frac{L_2 r}{\pi H r_*^2}.$$

Інтегрування по r :

$$r\mathcal{G}_{r1} = -\frac{L_2}{\pi H r_*^2} \frac{r^2}{2} + f_1(z).$$

Граничні умови: $r = 0$; $\mathcal{G}_{r1} = 0$; $f_1(z) = 0$

$$\mathcal{G}_{r1} = -\frac{L_2 r}{2\pi H r_*}. \quad (5.10)$$

Складові тангенціальних швидкостей визначимо із рівняння моментів кількості руху:

$$M(z + \Delta z) - M_z - M_* = 0, \quad (5.11)$$

де M_* – момент кількості руху, що виникає при взаємодії зовнішнього та внутрішнього шарів потоків, які обертаються, $H \cdot m$.

У зовнішньому шарі момент кількості руху можна визначити на основі загальних положень [12]:

$$M(z) = \int_r^{r_0} \rho v_{z2} 2\pi r dr v_{4r}. \quad (5.12)$$

При потенційній течії $v_\gamma r = const = K$, тоді

$$M(z) = 2\pi \rho v_{z2} \int_{r_s}^{r_0} (rdz).$$

Після інтегрування:

$$M(z) = \pi \rho V_{z2} \cdot K_2 \cdot r_* \cdot (r_0^2 - r_*^2). \quad (5.13)$$

Зміна моменту кількості руху на поверхні розділення потоків:

$$\Delta M_* = \rho |v_{r*}| 2\pi r_* \Delta z v_{\varphi*} r_* . \quad (5.14)$$

У диференціальній формі:

$$\frac{dM_*}{dz} = 2\pi\rho |v_{r*}| r_*^2 v_{\varphi*} .$$

Для представлення M_z у диференціальній формі продиференціюємо рівняння (5.13):

$$\frac{dM_z}{dz} = \pi\rho K (r_0^2 - r_*^2) \frac{dv_{z2}}{dz} .$$

Порівняння значень $\frac{dM}{dz}$:

$$\frac{dV_{z2}}{dz} (r_0^2 - r_*^2) = |v_{r*}| r_*^2 v_{\varphi*} .$$

Із вищенаведеного: $\frac{dv_{z2}}{dz} = -\frac{L_2}{\pi H (r_0^2 - r_*^2)}$,

тоді: $2 |v_{r*}| r_*^2 v_{\varphi*} = -\frac{K}{\pi H} L_2$.

Звідки $K = v_{\varphi} r = -\frac{\pi H 2 |v_{2*}| r_*^2 v_{\varphi*}}{L_2}$.

Із (4.2) $v_{r*} = -\frac{L_2}{2\pi H r_x}$, тоді $v_4 = -\frac{r_x^2 v_{\varphi x}}{r}$, $v_{\varphi x} = r_x \omega_1$;

$$v_{\varphi 2} = \omega_1(z) \frac{r_x^2}{r} . \quad (5.15)$$

Для внутрішнього шару:

$$v_{\varphi 1} = \omega_1(z) r \quad (5.16)$$

Характерні швидкості АЗЗП. Найбільш об'єктивною характерною швидкістю в апараті ЗЗП є кутова швидкість у вихідній трубі C_0 . Численними дослідженнями встановлено незмінність швидкості по перетину, тобто $C_0 = \text{const}$, а $v_{\varphi} = C_0 r$ [60,64].

Момент кількості руху у внутрішньому потоці:

$$M_1(z) = \int_0^{r_x=r_4} v_{z1} 2\pi r dr \omega_1(z) r \cdot r = 2\pi \rho v_{z1} \omega_1(z) \int_0^{r_4} r^3 dr = 2\pi \rho v_{z1} \omega_1(z) \frac{r_4^4}{4}.$$

При

$$z = H; \omega_1(z) = C_0; v_{z1} = \frac{L_1 + L_2}{\pi r_x^2} \frac{z}{H}; z = H; M_1(z) = M_{\text{ex}} = M_{\text{внх}}.$$

$$M_1(z = H) = \frac{\rho}{2} \frac{L_1 + L_2}{r_x^2} C_0 r_4^4; C_0 = \frac{2M_{\text{ex}} r_*^2}{\rho(L_1 + L_2)} r_4^4.$$

(5.17)

Зв'язок поточного значення $\omega_1(z)$ та C_0 .

Рівняння балансу моментів кількості руху в центральній зоні:

$$\frac{\Delta M_*}{\Delta z} = \frac{dM_1(z)}{dz},$$

$$\frac{2\pi \rho |v_{r*}| r_* \Delta z v_{\varphi*} r_*}{\Delta z} = \rho \frac{\pi}{2} \frac{r_x^4}{1} \frac{d}{dz} [v_{z1} \omega_1(z)],$$

$$\frac{4|v_{r*}|}{r_*^2} v_{4*} = \omega_1(z) \frac{dv_{z1}}{dz} + v_{z1} \frac{d\omega_1(z)}{dz},$$

$$v_{z1} = \frac{L_1 + L_2}{\pi r_*^2} \frac{z}{H}; \frac{dv_{z1}}{dz} = \frac{L_2}{\pi H r_*^2}; \quad (5.18)$$

$$\frac{4|V_{2*}|}{r_*^2} v_{\varphi*} = \omega_1(z) \frac{L_2}{\pi H r_*^2} + \frac{L_1 + L_2}{\pi r_*^2} \frac{z}{H} \frac{d\omega_1(z)}{dz};$$

$$v_{\varphi*} = \omega_1(z) r_*; v_{r*} = -\frac{L_2 r_*}{2\pi H r_*^2} = -\frac{L_2}{2\pi H r_*};$$

$$\frac{4}{r_*^2} \frac{L_2}{2\pi H r_*} \omega_1(z) r_* = \omega_1(z) \frac{L_2}{2\pi H r_*} - \frac{L_1 + L_2}{\pi r_*^2} \frac{z}{H} \frac{d\omega_1}{dz} = 0;$$

$$\frac{L_2}{\pi H r_*^2} \omega_1(z) = \frac{L_1 + L_2}{\pi r_*^2} \frac{z}{H} \frac{d\omega_1(z)}{dz};$$

$$\frac{d\omega_1(z)}{\omega_1(z)} = \frac{\frac{L_2}{H}}{L_1 + L_2 \frac{z}{H}} dz;$$

$$\int \frac{d\omega_1(z)}{\omega_1(z)} = \ln \omega_1(z); \int \frac{\frac{L_2}{H}}{L_1 + L_2 \frac{z}{H}} dz = \ln \left[L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right];$$

$$\ln \omega_1 + f_4 = \ln(L_1 + L_2) = \ln L_3;$$

$$f_4 = \ln L_3 - \ln C_0 = \ln \frac{L_3}{C_0};$$

$$\ln \omega_1(z) = \ln \frac{C_0 \left[L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right]}{L_3}; \quad \omega(z) = \frac{C_0 \left[L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right]}{L_3}.$$

(5.19)

Порівняння теоретичних даних з експериментальними проведено з використанням даних із полів швидкостей, що отримані Л.І. Гудимом у Московському текстильному інституті. Відхилення теоретичних значень від експериментальних стало: $v_\varphi = \pm 20\%$; $v_z = 40\%$; $v_r = 65\%$. У роботі наведені уточнення залежностей для розрахунку потоків швидкості.

5.2. Розрахунок полів швидкостей у циліндричних протитечних апаратах

Під час розробки моделей полів швидкостей необхідно розглянути фізичну модель руху газів у сепараційному просторі пиловловлювача (рис. 5.2).

На основі численних дослідів було встановлено наявність роздвоєння вхідного потоку L_3 на два потоки. Один (L_{10}) рухається у пристінній частині згори донизу й проходить висоту сепарації (H). У процесі руху частина потоку L_{20} переходить у внутрішній шар (L_{20}) поступово.

Перша частина проходить до самого низу $L_{10} = L_3 - L_{20}$.

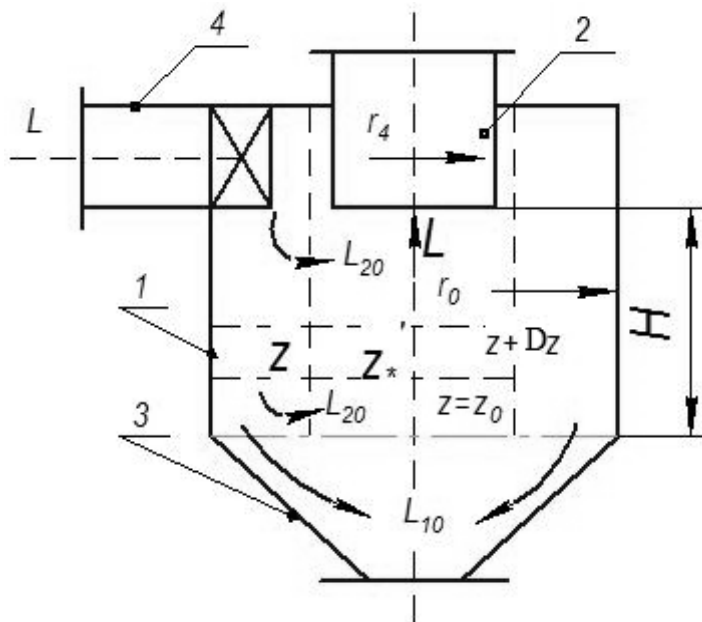


Рис. 5.2. Схема потоків протитечного циклона:
 1 – корпус; 2 – вихідна труба; 3 – конічна частина для розвантаження пилу; 4 – вхідний завихрювач запиленого газу; L_{20} – приосьовий потік; L_{10} – пристінний потік

У найнижчій частині з усього потоку залишається лише та частина, яка переходить у висхідний потік L_{10} , що є початковим для подальшого зростання. Цей змінний

потік позначаємо через L_{10} . У верхній частині значення $L_1(H)$ буде дорівнювати $L_1 = L_3 = L_{20} + L_{10}$. Значення L_{20} та L_{10} будемо називати частиною потоків. Таким чином, L_{20} – це потік, що входить у приосьову частину поступово, а L_{10} – потік, що доходить до самого низу, а потім повертає вгору. Значення витрат L_{20} та L_{10} можна обчислити, якщо знати величину коефіцієнтів роздвоєння потоків K_r . Також $L_{20} = L_3 K_\varepsilon$; $L_{10} = L_3 (1 - K_\varepsilon)$.

Витрати потоків необхідно знати в кожній частині апарата (у приосьовій зоні або периферійній), а також в залежності від розташування перетину (z) у сепараційній зоні ($H > z > 0$).

На межі розділення периферійного потоку L_2 (рухається вниз) та внутрішнього потоку (рухається вгору) значення роздільної швидкості можна вирахувати згідно з:

$$v_{r*} = \frac{L_{20}}{2\pi r_* H} \quad (5.20)$$

Зовнішній шар.

Розглянемо приріст витрат потоку $L_2(z)$ на ділянці Δz :

$$L_3(z + \Delta z) - L_3(z) = 2\pi r_* \Delta z v_{r*}. \quad (5.21)$$

У диференційній формі це рівняння буде мати вигляд:

$$\frac{dL_2(z)}{dz} = 2\pi r_* \frac{L_{20}}{2\pi r_* H} = \frac{L_{20}}{H},$$

Після інтегрування одержимо: $L_2(z) = \frac{L_{20}}{H} z + C$.

Граничні умови: $z=H, L_2(z) = L_3$,

$$C_1 = L_3 - \frac{L_{20}}{H} H = L_3 - L_{20} = L_{10},$$

$$L_3(z) = L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z. \quad (5.22)$$

З іншого погляду, на основі логічних міркувань можна отримати рівняння:

$$L_2(z) = L_3 - \frac{L_{20}}{H} (H - z). \quad (5.23)$$

Рівняння (5.23) можна привести до вигляду:

$$L_2(z) = L_2 - L_{20} + \frac{L_{20}}{H} z = L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z. \quad (5.24)$$

Внутрішній шар.

Приріст витрат:

$$L_1(z + \Delta z) - L_1(z) = v_{z*} \cdot 2\pi r_* \cdot \Delta z. \quad (5.25)$$

У диференційній формі:

$$\frac{dL_1(z)}{dz} = 2\pi r_* \frac{L_{20}}{2\pi r_* H} = \frac{L_{20}}{H};$$

після інтегрування: $L_1(z) = \frac{L_{20}}{H} z + C_1$;

граничні умови $z = H, L_1 = L_2 = L_3$;

$$L_1(z) = L_3 = \frac{L_{20}}{H} z + C_1; C_1 = L_3 - \frac{L_{20}}{H} H = L_3 - L_{20} = L_{10}$$

$$; L_2(z) = L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z.$$

Отже:

$$L_1(z) = L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z. \quad (5.26)$$

Рівняння (5.26) ідентичне (5.23).

Осьові швидкості потоків у внутрішньому шарі:

$$v_{z1} = \frac{L_1(z)}{\pi r_*^2} = \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2}; r_* > r > 0. \quad (5.27)$$

У зовнішньому шарі:

$$v_{z2} = -\frac{L_2(z)}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} = -\frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{n}}{\pi(r_0^2 - r_*^2)}. \quad (5.28)$$

З іншого погляду:

$$v_{z2} = -\frac{L_3 - \frac{L_{20}}{H}(H - z)}{\pi(r_0^2 - r_*^2)}. \quad (5.29)$$

Радіальні швидкості визначаються з рівняння дивергенції:

$$\frac{\mathcal{G}(rv_r)}{\mathcal{G}r} + \frac{\mathcal{G}(zv_z)}{\mathcal{G}z} + \frac{\mathcal{G}v_4}{\mathcal{G}4} = 1. \quad (5.30)$$

$V_\varphi = const$ на орбіті з постійним радіаном.

Тоді $\frac{dV_\varphi}{\mathcal{G}\varphi} = 0$. Замінімо \mathcal{G} на d зв'язку

двовірності потоків.

Радіальні швидкості потоків у внутрішньому шарі:

$$\frac{d(rv_{r1})}{dr} = -\frac{d}{dz} \left[r \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2} \right], \quad (5.31)$$

$$\frac{d(rv_{r1})}{dr} = -\frac{d}{dz} \left\{ \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2} \right\} = -r \frac{L_{20}}{\pi r_*^2}.$$

Проінтегруємо рівняння по r з граничними умовами $r = \sigma; v_{r1} = 0; f_1(z) = 0$:

$$v_{r1} = -\frac{r^2}{2} \left[\frac{L_{10}/H}{\pi r_*^2} \right] + f_1(z), \text{ отримаємо}$$

$$v_{r1} = -\frac{L_{20} \cdot r}{2\pi n \cdot r_*^2}. \quad (5.32)$$

Радіальні швидкості потоків у зовнішньому шарі:

$$\frac{d}{dr}(rv_2) = -r \frac{d}{dz} v_{z2},$$

$$\frac{d}{dz} \left[-\frac{L_{10} + L_2 \frac{z}{n}}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} \right] = -\frac{\frac{L_{20}}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} = \frac{L_{20}}{\pi H(r_0^2 - r_*^2)}, \quad (5.33)$$

$$\int d(rv_{r2}) = \int \frac{L_{20} r dr}{\pi H(r_0^2 - r_*^2)}; rv_{r2} = \frac{L_2}{\pi H(r_0^2 - r_*^2)} \frac{r_2}{2} + f_2(z)$$

, $r = r_0; v_{r2} = 0; f_2(z) = -\frac{L_{20}}{\pi H(r_0^2 - r_*^2)} \frac{r_0^2}{2};$

$$rv_{r2} = \frac{L_{20} r^2}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)} - \frac{L_{20} r_0^2}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)};$$

$$v_{r2} = \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r}.$$

(5.34)

Тангенціальні швидкості можна визначити з рівнянь моменту кількості руху в різних зонах. Для координат z та $z + \Delta z$ складемо рівняння балансу кількості руху: $M(z + \Delta z) - M_z - M_* = 0$.

$$\text{Складові рівняння: } M_z = \int_{r_*}^{r_0} \rho v_{z2} \cdot 2\pi r dr v_{\varphi} r_*.$$

Розрахунок зовнішнього шару виконуємо згідно закону тангенціального обертання $v_{\varphi} \cdot r = k = const$, тоді після інтегрування:

$$M_z = 2\pi \rho v_{z2} K \frac{r_0^2 - r_*^2}{2}. \quad (5.35)$$

Момент кількості руху на поверхні розділення потоків:

$$\Delta M_* = \rho |v_{z*}| 2\pi r_* \Delta z v_{\varphi*} r_*.$$

У диференційній формі:

$$\frac{dM_*}{dz} = 2\pi\rho |v_{z*}| r_*^2 v_{\varphi*}; \quad \frac{dM_*}{dz} = \pi\rho K (r_0^2 - r_*^2) \frac{dv_{z2}}{dz}.$$

Прирівнюємо ці співвідношення:

$$\frac{dM_*}{dz} = \frac{dM_z}{dz};$$

$$2\pi\rho |v_{r*}| r_*^2 v_{\varphi*} = \pi\rho K (r_0^2 - r_*^2) \frac{d}{dz} \left\{ -\frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} \right\},$$

$$\frac{d}{dz} \left\{ -\frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} \right\} = -\frac{\frac{L_{20}}{H}}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} = \frac{L_{20}}{\pi H (r_0^2 - r_*^2)};$$

$$2 |v_{r*}| r_*^2 \cdot v_{\varphi*} = K \frac{L_{20}}{\pi H},$$

звідки

$$K = v_{\varphi} r = -\frac{2\pi H |v_{r*}| r_*^2 v_{\varphi}}{L_{20}}; \quad v_{r*} = -\frac{L_{20} r_*}{2\pi r_*^2 H};$$

$$v_{\varphi 2} = -\frac{2\pi |v_{r*}| H r_*^2 \omega_1 r}{r L_{20}};$$

$$v_{r*} = -\frac{L_{20}}{2\pi r_* H}; \quad v_{\varphi 2} = \omega_1(z) \frac{r_*^2}{r}. \quad (5.36)$$

У внутрішньому шарі $v_{\varphi 1} = \omega_1(z) r$: для визначення характеристичної швидкості у вихідній трубі (C_0) визначено момент кількості руху в точці $z=H$, $r = r_{\varphi}$:

$$M_1(z) = \int_0^{r_4} \rho v_{z1} 2\pi r dr \omega_1(z) r \cdot r;$$

$$M_1(z) = 2\pi \rho v_{z1} \omega_1(z) \int_0^{r_4} r^3 dr = 2\pi \rho v_{z1} \omega_1(z) \frac{r_4^4}{4}.$$

(5.37)

Підстановка значення v_{z1} до рівняння (5.37) призводить:

$$M_1(z) = 2\pi \rho \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2} \omega_1(z) \frac{r_4^4}{4};$$

(5.38)

При $z = H; \omega_1(z) = C_0; M_1(z = H) = M_{\text{вих}} = M_{\text{ex}};$

$$M_{\text{ex}} = M_{\text{вих}} = \frac{\rho \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right)}{2\pi r_*^2} C_0 r_4^4;$$

$$C_0 = \frac{2M_{\text{ex}} r_*^2}{\rho L_3 r_4^4}; r_\varphi = r_*; C_0 = \frac{2M_{\text{ex}}}{\rho L_3 r_4^2}. \quad (5.39)$$

Знайдемо зв'язок поточного значення кутової швидкості $\omega_1(z)$ та C_0 . Складемо рівняння балансу за моментами кількості руху у внутрішньому шарі:

$$M_1(z) = \int \rho v_{z1} 2\pi r dr \frac{\omega_1(z) r \cdot r}{v_\varphi} = 2\pi \rho v_{z1} \omega_1(z) \frac{r_*^4}{4};$$

$$M_1(z) = \frac{\pi}{2} \rho v_{z1} \omega_1(z) r_*^4. \quad (5.40)$$

Використаємо також рівняння $\frac{M_*}{\Delta z} = \frac{dM_1}{dz};$

$$\rho |v_{r*}| r_*^2 v_{\varphi*} = \frac{d}{dr} \left[\rho \frac{\pi}{2} v_{z1} \omega_1(z) r_*^4 \right] = \rho \frac{\pi}{2} r_*^4 \frac{d}{dz} [v_{z1} \omega_1(z)];$$

$$\frac{4v_{r_*} v_{\varphi_*}}{r_*^2} = \omega_1(z) \frac{dv_{z1}}{dz} + v_{z1} \frac{d}{dz} \omega_1(z);$$

$$v_{\varphi_*} = \omega_1(z) r_*; |v_{r_*}| = -\frac{L_{20} r_*}{2\pi H r_*^2} = \left| \frac{L_{20}}{2\pi H r_*} \right|;$$

$$\frac{dv_{z1}}{dz} = \left[\frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2} \right] = \frac{L_{20}}{\pi H r_*};$$

$$v_{z1} \frac{d\omega_1(z)}{dz} = \frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}}{\pi r_*^2} \frac{d\omega_1(z)}{dz};$$

$$\frac{4 \left| \frac{L_{20}}{2\pi H r_*} \right|}{r_*^2} \omega_1(z) r_* = \omega_1(z) \frac{L_{20}}{\pi H r_*^2} + \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2} \frac{d\omega_1(z)}{dz};$$

$$\frac{2L_{20}}{\pi H r_*^2} \omega_1(z) - \frac{L_{20}}{\pi H r_*^2} \omega_1(z) - \frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}}{\pi r_*^2} \frac{d\omega_1(z)}{dz};$$

$$\omega_1(z) \frac{L_{20}}{H} = \frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}}{dz} d\omega_1(z); \frac{d\omega_1(z)}{\omega_1(z)} = \frac{dz \frac{L_{20}}{H}}{L_{10} + L_2 \frac{z}{H}};$$

$$\ln \omega_1(z) + f_4 = \frac{\frac{L_{20}}{H}}{\frac{L_{20}}{H}} \ln(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z),$$

$$\ln \omega_1(z) + f_4(z) = \ln(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z).$$

(5.41)

Граничні умови $\omega_1 = C_0; z = H$:

$$f_4 = \ln \frac{L_3}{C_0} \text{ і } \ln \omega_1(z) + \ln \frac{L_3}{C_0} = \ln \left[L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right];$$

$$\ln \omega_1(z) + f_4(z) = \ln \left[L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right]; \quad \omega_1(z) = C_0 \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{L_3} \quad (5.42)$$

5.3. Поле швидкостей у конічних протитечних апаратах

Конічна форма корпусу пиловловлювача дозволяє підвищити його ефективність за рахунок таких факторів:

- збереження, а іноді й підвищення тангенціальної швидкості обертання потоку через зменшення поверхні перерізу;

- зменшення довжини руху частинок у напрямку до стінок;

- деяка ламінізація обертання потоку в нижній частині конусу.

Але конічні апарати мають і деякі недоліки:

- підвищення втрат тиску;

- труднощі конструювання апаратів із зустрічними потоками;

- зменшена продуктивність по запиленому газу.

У конічних циклонах направлення потоків у зоні сепарації мало відрізняється від звичайного циліндричного апарату [67]. Гази із твердими частинками рухаються по периферії (зовнішній потік), опускаються по спіральній траєкторії донизу, потім піднімаються вгору в приосьову зону (внутрішній потік) і виходять через осьовий патрубок (рис. 5.3) [68].

У конічному циклоні, як і в циліндричному, більша частина вхідного потоку, з об'ємними витратами $L_{10} = L_3(1 - K_\varepsilon)$, опускається до самого дна циклону з наступним поворотом і рухом угору до вихідного

патрубка. Друга частина потоку, з об'ємними витратами $L_{20} = L_3 K_\varepsilon$, поступово входить у внутрішній шар. Значення коефіцієнта розділення K_ε приблизно дорівнює 0,25-0,4.

Основні позначення геометричних параметрів конічного циклона наведені на рис. 5.3.

Межа розділення потоків – це конічна поверхня з радіусами основ цих частин: r_{*H} – радіус переходу конуса в циліндричну частину, m ; r_{*5} – радіус пилевипускного отвору, m ; α_* – кут нахилу поверхні розділення потоків до осі апарату; α – кут нахилу стінок конуса.

Виберемо довільний перетин у конічній частині апарату на висоті (z). Визначимо значення витрат газу у внутрішньому шарі ($r_{*z} > r > 0$) і зовнішньому ($r_z > r > r_{*z}$), r_* – значення радіуса перехідної зони на висоті (z).

При зростанні висоти конуса на Δz зміниться значення витрат газу $L_1(z)$ до величини $L_1(z + \Delta z)$. Погоджуємося з рівномірним входженням вторинного потоку у внутрішній шар зі швидкістю V_{r*} , одержимо:

$$L_1(z + \Delta z) - L_1(z) = \Delta \rho_{\text{бок}} V_{r*}, \quad (5.43)$$

де $\Delta \rho_{\text{бок}}$ – елементарна поверхня конічної поверхні; $\rho_{\text{бок}}$ – повна поверхня.

$$\Delta \rho_{\text{бок}} = \frac{2\pi\Delta z}{\cos \alpha_*} [r_{*5} + z \cdot \text{tg} \alpha_*]; \quad (5.44)$$

$$\rho_{\text{бок}} = \frac{\pi H}{\cos \alpha_*} [r_{*H} + r_{*5}]. \quad (5.45)$$

Вираз для визначення об'ємних витрат газу у внутрішньому потоці, отриманий після перетворень рівнянь (5.43-5.45):

$$L_1(z) = L_3 \left\{ 1 + \frac{K_\varepsilon}{H + (r_{*4} + r_{*5})} \right\} \left[2r_{*5}(z - H) + \operatorname{tg} \alpha_* (z^2 - H^2) \right] \quad (5.46)$$

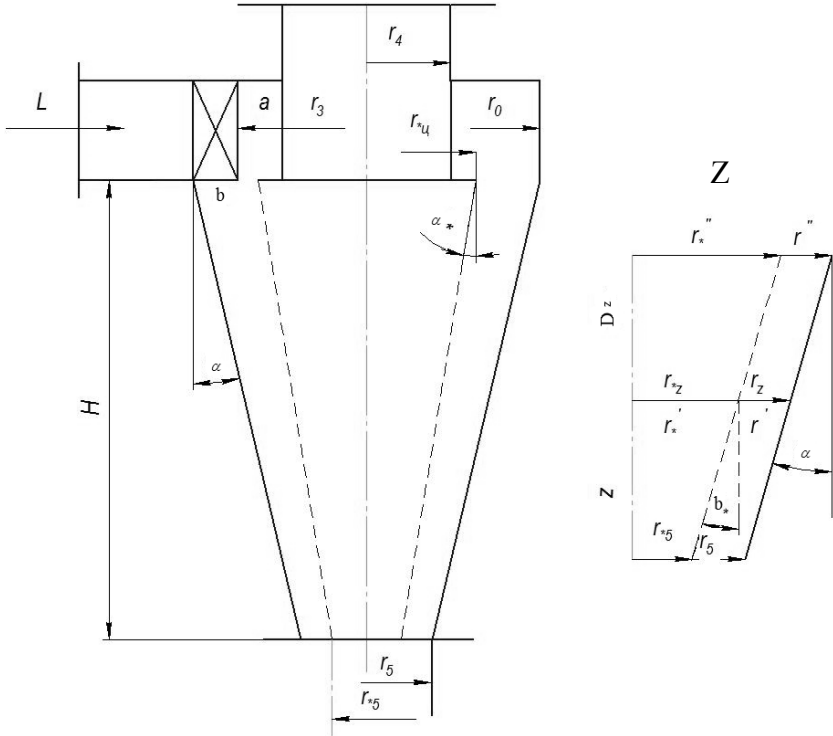


Рис. 5.3. Схема конічного циклону.

Аналогічно, об'ємні витрати зовнішнього потоку дорівнюють:

$$L_2(z) = L_3 \left\{ 1 + \frac{K_r}{H(r_{*4} + r_{*5})} \left[2r_{*5}(z - H) + \operatorname{tg} \alpha_* (z^2 - H^2) \right] \right\} \quad (5.47)$$

По значеннях витрати газу у внутрішньому й зовнішньому потоках можна розрахувати осьові швидкості:

$$v_{z1} = \frac{L_1(z)}{\rho_1(z)} = \frac{L_3 \left\{ 1 + \frac{K_r}{H(r_{*y} + r_{*5})} [2r_{*5}(z-H) + tg\alpha_*(z^2 - H^2)] \right\}}{\rho_1(z)} \quad (5.48)$$

$$v_{z2} = \frac{L_3 \left\{ 1 + \frac{K_r}{H(r_{*y} + r_{*5})} [2r_{*5}(z-H) + tg\alpha_*(z^2 - H^2)] \right\}}{\rho_2(z)}. \quad (5.49)$$

Рівняння (5.47, 5.48) рівнозначні за витратами, так як обидва потоки обмінюються рівними значеннями пристрів $\pm \Delta L$.

Рівняння радіальних швидкостей встановлені поняттям дивергенції [69, 70].

$$\operatorname{div} V = 0: \quad \frac{\partial}{\partial r}(rv_r) + \frac{\partial}{\partial z}(rv_z) + \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \quad (5.50)$$

$$\text{На орбіті з радіусом } r = \text{const}, v_\varphi = \text{const}, a \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} = 0.$$

Інтегрування рівняння (5.50) з межовими умовами $z = 0, v_r = 0$ дозволяє за допомогою рівняння вирахувати радіальну швидкість у внутрішньому шарі:

$$v_{r1} = \frac{r}{2} \varphi_1(z); \quad (5.51)$$

$$\varphi_1(z) = \frac{\partial v_{z1}}{\partial z} = \frac{\pi_*^2 \frac{2L_3 K_r r_{*z}}{H(r_{*5} + r_{*y})} - L_3 \left\{ 1 + \frac{K_r}{H(r_{*5} + r_{*y})} \cdot [2r_{*5}(z-H) + tg\alpha_*(z^2 - H^2)] \right\} 2\pi_* tg\alpha_*}{\pi_*^2 r_{*z}^4}$$

У зовнішньому шарі радіальна швидкість дорівнює:

$$v_{r2} = \frac{\varphi_2(z)}{2} \left[\frac{r_z^2 - r^2}{r} \right]; \quad (5.52)$$

$$\varrho_2(z) = \frac{\partial v_{z2}}{\partial z} = \frac{\pi \left[(r_5^2 - r_{*5}^2) + 2z(r_5^2 \operatorname{tg} \alpha - r_{*5}^2 \operatorname{tg} \alpha_*) + z^2 (\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \alpha_*) \cdot \frac{L_3 K_r}{H(r_{*4} + r_{*5})} [2r_{*5} + 2z \operatorname{tg} \alpha] - L_3 \right] \times \left\{ 1 + \frac{K_\varepsilon}{H(r_{*4} + r_{*5})} \left[2r_{*5} (z - H) + \operatorname{tg} \alpha (z^2 - H^2) \right] \pi \left[2[r_5^2 \operatorname{tg} \alpha - r_{*5}^2 \operatorname{tg} \alpha] + 2z (\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \alpha_*) \right] \right\}}{\pi^2 \cdot \left[(r_5^2 - r_{*5}^2) + 2z(r_5^2 \operatorname{tg} \alpha - r_{*5}^2 \operatorname{tg} \alpha) - r_{*5}^2 \operatorname{tg} \alpha + z^2 (\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \alpha_*) \right]} \quad (5.53)$$

Тангенціальні швидкості газового потоку визначені з умов збереження моменту кількості руху газу:

$$M(z + \Delta z) - M_z - \Delta M_* = 0; \quad (5.54)$$

$$M_z = \int_{r_{*z}}^{r_z} 2\pi \rho r dr v_z v_\varphi r; \quad (5.55)$$

$$\Delta M_* = \Delta \rho_{\text{бок}} v_{*r} \cos \alpha_* \rho v_{*\varphi} r_{*z}. \quad (5.56)$$

Погоджуємося, що у внутрішньому шарі газ обертається за законом твердого тіла ($v_{\varphi 1} = \omega_1(z)r$), а в зовнішньому шарі – за законом потенційного обертання ($v_{\varphi 2} = \omega_1(z) \frac{r^{*2}}{r}$).

Значення кутової швидкості в довільному перетині $\omega_1(z)$ визначимо з балансу моментів кількості руху:

$$\omega_1(z) = C_0 \frac{r_{*4}^2}{r_{*z}^2} \left\{ 1 + \frac{K_\varepsilon}{H(r_{*4} + r_{*5})} \left[2r_{*5} (z - H) + \operatorname{tg} \alpha (z^2 - H^2) \right] \right\}, \quad (5.57)$$

де C_0 – кутова швидкість обертання газу у вихідному патрубку, c^{-1} .

$$C_0 = \frac{2M_{\text{ex}}}{\rho L_3 r_4^2}, \quad (5.58)$$

де M_{ex} – вхідний момент кількості руху газу, $H \cdot m$.

Порівняння отриманих теоретичних значень швидкостей з експериментальними даними проводилися з

використанням поля швидкостей класичного циклона Тер-Ліндена, описаного в багатьох джерелах. Похибка теоретичних значень швидкостей відносно експериментальних складає $v_4 = 30 - 40\%$; $v_z = 40 - 55\%$; $v_r = 60 - 70\%$.

Отримані рівняння дозволяють використовувати їх при розрахунках ефективності вловлення частинок і гідравлічного опору конічних циклонних пиловловлювачів.

5.4. Розрахунок ефективності відцентрових циліндричних пиловловлювачів – апаратів із зустрічними закрученими потоками

В апаратах із зустрічними закрученими потоками (АЗЗП) на частинки в потоці, що обертається, діють відцентрові сили ($m\omega^2 r$) та сила опору потоку $\left(3\pi d\mu \frac{dr}{dt}\right)$. Частинки пилу здійснюють рух, що надходить у напрямку периферії зі швидкістю $\left(\frac{dr}{dt}\right)$. Окрім того, радіальним стоком, утвореним завдяки тиску, частинки також зносяться до центру.

Рівняння руху частинок у закрученому потоці отримується з рівняння Ньютона:

$$m\omega^2 r = 3\pi d\mu \left(\frac{dr}{dt} - v_r \right). \quad (5.59)$$

Значення складових рівняння (5.59) залежить від місця знаходження частинок, наприклад, у внутрішньому шарі ($r_* > r > 0$) або у зовнішньому шарі ($r_0 > r > r_*$).

Численними експериментальними дослідженнями [71] встановлено, що в зовнішньому шарі газ рухається за законом потенційної течії ($v_\varphi r = K_\varphi = const$), а у

внутрішньому шарі рух відповідає закону обертання твердого тіла ($\omega r = v_\varphi$).

Виходячи зі сказаного про розподілення швидкостей газу, розглянемо ймовірність уловлення частинок пилу окремо в зовнішньому і внутрішньому шарах. Уперше такий підхід був запропонований американськими дослідниками [72-74]. Отримано залежності, що виконані на їх основі [75].

Складові рівняння (5.59) наведено вище.

Кутові швидкості:

$$\omega_1(z) = C_0 \left\{ \frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{L_3} \right\}$$

$$; \omega = \omega_1(z) \frac{r_*^2}{r^2} = C_0 \left\{ \frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{L_3} \right\} \frac{r_*^2}{r^2}. \quad (5.60)$$

Осьові швидкості:

$$v_{z2} = -\frac{L_2 \cdot z}{\pi H (r_0^2 - r_*^2)}; v_{r2} = \frac{L_2 (r^2 - r_0^2)}{2\pi H (r_0^2 - r_*^2) r}, \quad (5.61)$$

де C_0, ω, ω_1 – кутові швидкості потоку у вихідній трубці, у заданій точці та у внутрішньому шарі відповідно, c^{-1} ; t – тривалість, c ; L_2, L_1 – витрати вторинного та первинного потоків, m^3 / c ; v_{z2}, v_{r2} – осьова і радіальна швидкості, m / c ; $r, r_0, r_*, r_1, r_2, r_3, r_4$ – радіуси, корпусу, зони розділення потоків, обтікача, завихровувача первинного потоку, вторинного потоку, вихідної труби відповідно, m .

Розрахунок ефективності у зовнішньому шарі.

Підстановка значень у рівняння (5.61) дає рівняння:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{m\omega^2 r}{3\pi d\mu} + v_r \quad (5.62)$$

$$\text{Зазначимо, що } dz = \frac{dz}{v_z}; \frac{dr}{dt} = v_z \frac{dr}{dz}; \quad (5.63)$$

Підстановка значень рівняння (5.63) в (5.62) дає наступне:

$$v_{z^2} \frac{dr}{dz} = \frac{1}{6} \frac{\pi d^3 \rho \omega^2 r}{3\pi d\mu} + \frac{L_2(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r}. \quad (5.64)$$

Підстановка значень v_z та ω в рівняння (5.64) приводить до залежності:

$$\frac{L_2 z}{\pi H(r_0^2 - r_*^2)} \frac{dr}{dz} = \frac{d^2 \rho_m}{18\mu} C_0 r \left[\frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{L_3} \right]^2 \frac{r_*^4}{r^4} - \frac{L_2(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r}. \quad (5.65)$$

Змінимо напрям z для зовнішнього шару за напрямком потоку зверху-вниз. Тоді знак (-) перед формулою швидкості v_z зміниться на (+).

Перетворимо рівняння (5.65) до вигляду зручного для інтегрування з виносом (r) у ліву частину, а (z) у праву:

$$r^3 dr = \frac{d^2 \rho_m C_0^2 r_*^4}{18\mu} \left[\frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{L_3} \right]^2 \frac{\pi(r_0^2 - r_*^2)}{L_2 \frac{z}{H}} dz + \frac{(r^2 - r_0^2)r^2 dz}{2z} - \frac{(r^2 - r_0^2)r^2 dz}{2z}. \quad (5.66)$$

Після перетворення:

$$\frac{\left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right)^2}{\frac{L_2 z}{H}} = \frac{L_1^2 + 2L_1 \cdot L_2 \frac{z}{H} + \left(L_2 \frac{z}{H} \right)^2}{\frac{L_2 z}{H}}; \quad (5.67)$$

інтегрування складових:

$$\int \frac{L_1^2 H}{L_2 z} dz = \frac{L_1^2 H}{L_2} \int \frac{dz}{z} = \frac{L_1^2 H}{L_2} \ln z \Big|_0^H.$$

Розкладання в ряд [76,77]:

$$\ln z = \left[(z-1) - \frac{(z-1)^2}{2} + \frac{(z-1)^3}{3} - \frac{(z-1)^4}{4} + \frac{(z-1)^5}{5} \right]_0^H = \left[(H-1) - \frac{(H-1)^2}{2} + \frac{(H-1)^3}{3} - \frac{(H-1)^4}{4} + \frac{(H-1)^5}{5} + 2,283 \right]$$

$$\int_0^H 2L_1 dz = \int_0^H L_1 dz = 2L_1 H ;$$

$$\int_0^H \frac{\left(L_2 \frac{z}{H} \right)^2}{\frac{L_2 z}{H}} dz = \int_0^H L_2 \frac{z}{H} dz = L_2 \frac{z^2}{2H} \Big|_0^H = L_2 \frac{H}{2} ;$$

$$\int_r^{r_0} r^3 dr = \frac{r_0^4 - r_4}{4}. \quad (5.68)$$

Підстановка значень інтегрування дозволяє вивести рівняння до вигляду:

$$\frac{r_0^4 - r_4}{4} = d^2 \frac{2\varphi_m C_0^2 r_0^4 (r_0 + r_*) (r_0 - r_*)}{18\mu L_3^2} \left\{ 2L_1 H + \frac{L_2 K}{2} + \frac{L_1^2 H}{L_2} \left[(H-1) - \frac{(H-1)^2}{2} + \frac{(H-1)^3}{3} - \frac{(H-1)^4}{4} + \right] \right\} +$$

$$+ \frac{(H-1)^5}{5} + 2,283 +$$

$$\frac{(r^2 - r_0^2) r^2}{2} \left[(H-1) - \frac{(H-1)^2}{2} + \frac{(H-1)^3}{3} - \frac{(H-1)^4}{4} + \frac{(H-1)^5}{5} + 2,283 \right] \quad (5.69)$$

Позначимо:

$$\left[(H-1) - \frac{(H-1)^2}{2} + \frac{(H-1)^3}{3} - \frac{(H-1)^4}{4} + \frac{(H-1)^5}{5} + 2,283 \right] = 2L_1 H + \frac{L_2 H}{2} f(H_1) = f(H) \quad (5.70)$$

Перетворення квадратичних функцій:

$$r_0^4 - r^4 = (r_0 - r)(r_0 + r)(r_0^2 + r^2),$$

$$r_0^2 - r_*^2 = (r_0 - r_*)(r_0 + r_*). \quad (5.71)$$

Перетворення до вигляду:

$$\frac{r_0 - r}{r_0 - r_*} = d^2 \frac{2\pi\rho_m C_0^2 r_*^4 (r_0 + r_*) f(H)}{9\mu L_3^2 (r_0 + r)(r_0^2 + r^2)} + \frac{(r^2 - r_0^2) r^2 f(H)}{2(r_0 + r)(r_0^2 + r^2)(r_0 - r_*)} \quad (5.72)$$

Відношення $\frac{r_0 - r}{r_0 - r_*}$ є ймовірністю уловлення

частинки, яка відповідає за своїми параметрами орбіті. При

$r = r_{cp} = \frac{r_0 + r_*}{2}$ матимемо:

$$\eta_2 = d^2 \frac{2\pi\rho_m C_0^2 r_*^4 (r_0 + r_*) f(H)}{9\mu L_3^2 (r_0 + r_{cp})(r_0^2 + r_{cp}^2)} + \frac{(r_{cp}^2 - r_0^2) r_{cp}^2 f(H)}{2(r_0 + r_{cp})(r_0^2 + r_{cp}^2)(r_0 + r_*)}. \quad (5.73)$$

Розрахунок ефективності у внутрішньому шарі.

Рівняння руху у внутрішньому шарі відповідає рівнянням (5.59) та (5.62). Складові рівняння після деяких перетворень мають вигляд:

$$\omega_1(z) = C_0 \left[\frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{L_3} \right], \quad \omega = \omega_1 \frac{r}{r} = \omega_1(z),$$

$$V_{z1} = \frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{\pi r_*^2}, \quad V_{r1} = \frac{L_1 r}{2\pi r_*^2 H}. \quad (5.74)$$

Підстановка в рівняння (5.62) дає вираз:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{m\omega^2(z)r}{3\pi d\mu} + V_r \quad (5.75)$$

або

$$V_z \frac{dr}{dt} = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho_m \omega_1^2(z) r - \frac{L_2 r}{2\pi r_*^2 H}. \quad (5.76)$$

Після заміни складових отримаємо:

$$\frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{\pi r_*^2} \frac{dr}{dt} = \frac{d^2 \rho_m C_0^2 \left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right)^2}{18 \mu L_3^2} r - \frac{L_2 r}{2 \pi r_*^2 H}. \quad (5.77)$$

Після розділення перемінних отримаємо рівняння:

$$\frac{dr}{r} = \pi r_*^2 C_0^2 \frac{d^2 \rho_m \left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right)^2}{18 \mu L_3^2} dz - \frac{L_2 r}{2H \left[L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right]}. \quad (5.78)$$

Інтегрування складових: $\int_r^{r_*} \frac{dr}{r} = \ln \frac{r_*}{r} = \ln \frac{1}{1-r}. \quad (5.79)$

Пояснення до (5.79): $\frac{r_* - r}{r_x} = \eta, \quad 1 - \frac{r}{r_x} = \eta,$

$$\frac{r}{r_x} = 1 - \eta, \quad \frac{r_x}{r} = \frac{1}{1 - \eta}.$$

$$\int_0^H \left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right) dz = L_1 z + L_2 \frac{z^2}{2H} = L_1 H + L_2 \frac{H}{2} = H \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right); \quad (5.80)$$

$$\int_0^H \frac{dz}{L_1 + \frac{L_2}{H} z} = \frac{1}{\frac{L_2}{H}} \ln \left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right) = \frac{H}{L_2} [\ln(L_1 + L_2) - \ln L_1] = \frac{H}{2} \ln \frac{L_1 + L_2}{L_1}. \quad (5.81)$$

Для внутрішнього шару:

$$\ln \frac{1}{1-\eta} = d^2 \frac{\rho_m \pi r_*}{18 \mu L_3^2} C_0^2 H \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right) - \frac{1}{2} \ln \frac{L_1 + L_2}{L_1}. \quad (5.82)$$

Позначимо:

$$A = d^2 \frac{\rho_m \pi r_*}{18 \mu L_3^2} C_0^2 H \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right) - \frac{1}{2} \ln \left[\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right], \quad \text{тоді}$$

$$1 - \eta = \frac{1}{\exp A},$$

$$\eta = \frac{\exp A - 1}{\exp A}. \quad (5.83)$$

Приклад розрахунку фракційної ефективності в апараті із зустрічними закрученими потоками конструкції Московського текстильного інституту для вловлення кварцевого пилу АЗЗП-200.

Апарат АЗЗП-200 має наступні геометричні параметри:

$$r_0 = 0,1\text{м}; r_1 = 0,02\text{м}; r_2 = 0,05\text{м}; r_3 = 0,06\text{м};$$

$$a_1 = 0,1\text{м}; a_2 = 0,13\text{м}; v_1 = 0,03\text{м}; v_2 = 0,04\text{м};$$

$$r_m = 0,085\text{м}; H = 0,4\text{м}; r_{cp2} = \frac{r_0 + r_x}{2} = \frac{0,1 + 0,06}{2} = 0,08\text{м}$$

Технологічні параметри:

$$\rho_m = 2650 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; L_1 = 0,05495 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 197,82 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$L_2 = 0,10205 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 367,4 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}; L_3 = 0,157 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 565,2 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

$$\text{Відношення потоків: } \varepsilon = \frac{L_2}{L_1} = 1,857.$$

Кратність потоків:

$$K = \frac{L_2}{L_3} = 0,65; V_{\varphi1} = 18,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}; V_{\varphi2} = 19,62 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Розрахунок показників фракційної ефективності вловлення кварцевого пилу з $\rho_m = 2650 \text{кг} / \text{м}^3$.

Вхідні моменти кількості руху:

$$M_{ex} = \frac{2}{3} \rho \cdot L \cdot V_{ex} \frac{r_{зв}^3 - r_{вн}^3}{r_{зв}^2 - r_{вн}^2},$$

де ρ – густина повітря (газу), $\text{кг} / \text{м}^3$; L – витрати газу, $\text{м}^3 / \text{с}$; V_{ex} – швидкість входу газу у завихрювач, $\text{м} / \text{с}$; $r_{зв}, r_{вн}$ – зовнішній і внутрішній радіуси завихрювача, м .

Внутрішній завихровувач:

$$r_{36} = r_2 = 0,05 \text{ м}; r_{6H} = r_1 = 0,02 \text{ м};$$

$$r_{36}^3 - r_{6H}^3 = 0,05^3 - 0,02^3 = 117 \cdot 10^{-6} \text{ м}; r_{36}^2 - r_{6H}^2 = 0,052 - 0,022 = 0,0021 \text{ м}$$

$$M_{\text{ex1}} = \frac{2}{3} 1,21 \cdot 0,05495 \cdot 18,3 \frac{117 \cdot 10^{-6}}{0,0021} = 0,0462 \text{ (H} \cdot \text{м)}.$$

Завихровувач зовнішнього потоку:

$$r_{36} = r_0 = 0,1 \text{ м}; r_{6H} = r_4 = 0,06 \text{ м};$$

$$r_{36}^3 - r_{6H}^3 = 0,1^3 - 0,06^3 = 784 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$r_{36}^2 - r_{6H}^2 = 0,1^2 - 0,06^2 = 0,0064 \text{ м};$$

$$M_{\text{ex2}} = \frac{2}{3} 1,21 \cdot 0,10205 \cdot 19,62 \frac{784 \cdot 10^{-6}}{0,0064} = 0,198 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Характеристична кутова швидкість:

$$C_0 = \frac{2M_{\text{ex}}}{\rho_x \cdot L_3 \cdot r_4^2} = \frac{2 \cdot 0,243}{1,21 \cdot 0,157 \cdot 0,06^2} = 710,64 \frac{1}{\text{с}}.$$

$$M_{\text{ex}} = M_{\text{ex1}} + M_{\text{ex2}} = 0,0452 + 0,198 = 0,243 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначення функцій $f(H)$ та $f(H_1)$:

$$f(H_1) = \left[(H-1) - \frac{(H-1)^2}{2} + \frac{(H-1)^3}{3} - \frac{(H-1)^4}{4} + \frac{(H-1)^5}{5} + 2,83 \right] =$$

$$= \left[(0,4-1) - \frac{(0,4-1)^2}{2} + \frac{(0,4-1)^3}{3} - \frac{(0,4-1)^4}{4} + \frac{(0,4-1)^5}{5} + 2,83 \right] = 1,93;$$

$$f(H_1) = 2HL_1 + \frac{L_2 H}{2} + \frac{L_1^2 H}{L_2} f(H_1) = 2 \cdot 0,4 \cdot 0,05495 + \frac{0,10205 \cdot 0,4}{2} + \frac{0,05415^2 \cdot 0,4}{0,10205} 1,93 = 0,0872$$

Розрахунок ефективності у зовнішньому шарі.

$$d^2 \cdot 2\pi \cdot \rho_m C_0^2 r_*^4 (r_0^2 + r_{cp}^2) fH = d^2 \cdot 6,28 \cdot 2650 \cdot 710,64^2 \cdot 0,06^4 (0,1 + 0,06) \cdot 0,0872 = d^2 \cdot 1519,66$$

Знаменник першого складового:

$$9\mu L_3^2 (r_0 + r_{cp}) (r_0^2 + r_{cp}^2) = 9 \cdot 0,018 \cdot 10^{-3} \cdot 0,157^2 (0,1 + 0,08) (0,1^2 + 0,08^2) = 1,1 \cdot 10^{-8}$$

Перша складова: $\frac{1519,66d^2}{1,1 \cdot 10^{-8}} = 1,38 \cdot 10^{11} d^2$.

Чисельник другої складової:

$$(r_{cp2} - r_0^2) \cdot r_{cp2}^2 \cdot f(H_1) = (0,08^2 - 0,1^2) \cdot 0,08^2 \cdot 1,93 = 4,447 \cdot 10^{-5}.$$

Знаменник другої складової:

$$2(r_0 + r_{cp2})(r_0^2 + r_{cp2}^2)(r_0 - r_*) = 2(0,1 + 0,08)(0,1^2 + 0,08^2)(0,1 - 0,06) = 0,0002361.$$

Друга складова: $\frac{4,447 \cdot 10^{-5}}{0,00023616} = -0,19$;

$$\eta_{cp2} = d^2 \cdot 1,38 \cdot 10^{11} - 0,19.$$

Діаметри частинок за експериментом:

$$d_r: 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5.$$

Ефективність (η_{cp2}) уловлення пилу в зовнішньому шарі при діаметрі d_2 складатиме, %:

$$\eta_{2,0} = (2 \cdot 10^{-0})^2 \cdot 1,38 \cdot 10^{11} - 0,19 = 4 \cdot 10^{-1} \cdot 1,38 - 0,19 = 0,362 = +36,2\%;$$

$$\eta_{2,5} = +67,25\%; \eta_{3,0} = 105,2\% = 100\%;$$

$$\eta = 3,0 \quad d > 3 \text{ мкм}; \quad \varepsilon = 100\%.$$

Внутрішній

шар:

$$\eta_{cp1} = \frac{\exp A - 1}{\exp A};$$

$$A = d^2 \frac{\pi \rho_m r_*^2 C_0^2 \cdot H \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right)}{18 M L_3^2} - \frac{1}{2} \ln \frac{L_1 + L_2}{L_1};$$

$$L_1 + \frac{L_2}{2} = 0,05495 + \frac{0,10205}{2} = 1,105975;$$

$$\ln \frac{L_1 + L_2}{L_1} = \ln \frac{0,05495 + 0,105975}{0,05495} = \ln 2,857 = 1,04972;$$

$$A = \frac{d^2 3,14 \cdot 2650 \cdot 0,06^2 \cdot 710,64^2 \cdot 0,4 \cdot 0,105975}{18 \cdot 0,018 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1572} - \frac{1}{2} 1,04972;$$

$$A = d^2 8,03 \cdot 10^{10} - 0,5249.$$

Ефективність уловлення пилу даної фракції (d) у внутрішньому шарі:

$$\eta_{cp2,0} : A = H \cdot 8,03 \cdot 10^{10} - 0,525 = 0,8156; \eta_{cp} = -22,6\%;$$

$$\eta_{cp2,5} = -2,33\%; \eta_{4,5} = +66,6\%; \eta_{7,0} = +96,6\%;$$

$$\eta_{cp3,0} = +17,94\%; \eta_{5,0} = +77,3\%; \eta_{7,5} = +98,15\%;$$

$$\eta_{3,5} = +36,7\%; \eta_{5,5} = +85,3\%; \eta_{6,5} = +94,3\%;$$

$$\eta_{4,0} = 53,4\%; \eta_{6,0} = +90,3\%.$$

Співставлення розрахункових показників фракційної ефективності з експериментальними даними, проведеними у м. Москва [64] представлено в таблицях 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1

Порівняння теоретичних та експериментальних показників фракційної ефективності у зовнішньому шарі

| d , мм | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 |
|---------------|-------|-------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|
| $\eta_{теор}$ | +36,2 | +67,2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| $\eta_{експ}$ | +13 | +30 | +48 | +65 | +75 | +85 | +90 | +99 | +96 |
| Δ % | 64 | 22,8 | 52,0 | 35 | 25,0 | 15,0 | 10 | 7 | 4,0 |

$$\Delta = \frac{\eta_{теор} - \eta_{експ}}{\eta_{теор}}$$
 – відносна похибка теоретичних розрахунків.

Таблиця 5.2

Порівняння теоретичних та експериментальних показників фракційної ефективності у внутрішньому шарі АЗП-200

| d, мкм | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 6,0 |
|---------------------------|-----------|------|----------|-----------|-----------|------------|------------|-------|-----------|
| $\eta_{\text{теор}}$ % | - 22,6 | -2,3 | 17,9 | 36,7 | 53,4 | 66,6 | 77,3 | 85,3 | 90,6 |
| $\eta_{\text{екс}}$ п% | 12,5 | 27,5 | 45 | 60 | 73 | 82 | 87 | 92 | 95 |
| Δ , % | 155 | 129 | - 233 | - 38,8 | - 83,3 | - 116,4 | - 12,58 | -7,85 | - 14,2 |

Співставлення теоретичних значень з експериментальними даними показало середню відносну похибку на рівні 19,9%. У внутрішньому шарі похибка значно вища: так для дрібних частинок (2-3,0 мкм) вона перевищує 100 %, для більших частинок (3,5-2,5 мкм) похибка складає 31,3 %.

5.5. Розрахунок ефективності протитечних відцентрових пиловловлювачів (циклонів)

Циклонні пиловловлювачі – найбільш поширені апарати в хімічній і харчових виробництвах. Вони прості за конструкцією, в обслуговуванні та надійні в експлуатації. Прогнозування ефективності пиловловлювачів є важливим науково-технічним завданням. У більшості випадків використовуються методи розрахунку, що часто не враховують усього різноманіття впливаючих геометричних і технологічних параметрів пиловловлювачів, а також гідродинамічну структуру потоків у сепараційній зоні апаратів [13, 18] з урахуванням сучасного методу розрахунку структури потоків [75, 77, 78].

У цій роботі використано новий [79, 80] теоретичний підхід, щодо вирішення завдання розрахунку фракційної ефективності протитечних циклонних пиловловлювачів, на основі аналізу руху частинок пилу та газу в закрученому потоці з подальшим залученням експериментальних даних Науково-дослідного інституту очищення газів, отриманих під час проведення випробувань дослідних і промислових зразків циклонних пиловловлювачів.

Для визначення фракційної ефективності необхідне знання структури потоку в зоні пиловловлювання. У даному розділі будемо використовувати рівняння полів швидкостей, що наведені в розділі 5.2, незважаючи на невелику точність визначення складових швидкостей, особливо радіальних. З використанням коефіцієнтів кореляції, на основі експериментальних даних, можна досягти значного підвищення збіжності розрахункових та експериментальних ефективностей.

На частинки пилу в обертальному потоці діє відцентрова сила. Їй протидіє сила опору в'язкого потоку рідини, яку можна розподілити на опір потоку в нерухомому шарі газу та опір стоку зовнішніх шарів газу у внутрішні.

Рівняння руху частинок у закрученому потоці еквівалентне (5.59):

$$m\omega^2 r = 3\pi d\mu \left(\frac{dr}{dt} - v_r \right). \quad (5.83)$$

Складові, необхідні для рішення рівняння, отримані в розділі (5.2):

$$v_{z2} = -\frac{L_2(z)}{\pi(r_0^2 - r_x^2)} = -\frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}}{\pi(r_0^2 - r_x^2)};$$

$$v_{r2} = \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_x^2)r}; \quad \omega_1(z) = C_0 \frac{L_{10} + \frac{L_2}{H} z}{L_3};$$

$$\omega = \omega_1(z) \frac{r_*^2}{r^2}; C_0 = \frac{2M_{ex} r_*^2}{L_3 \rho r^4}.$$

При $r_4 = r_*$: $C_0 = \frac{2M_{ex}}{\rho L_3 r^2}$.

Підстановка значень в (5.83) приводить:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{m\omega^2 r}{3\pi d\mu} + v_z; \quad (5.84)$$

з іншого боку $dt = \frac{dz}{v_z}$; $\frac{dr}{dt} = v_z \frac{dr}{dz}$.

Підстановка цих значень в (5.84) приводить:

$$v_z \frac{dr}{dz} = \frac{\frac{1}{6} \pi d^3 \rho \omega^2 r}{3\pi d\mu} + \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r}. \quad (5.85)$$

Підстановка значень v_z, ω в рівняння (5.85) приводить:

$$\frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi(r_0^2 - r_*^2)} \frac{dr}{dz} = \frac{d^2 \rho C_0^2}{18\mu} \left[\frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{L_3} \right]^2 \left[\frac{r_*^4}{r^3} + \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r} + \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r} \right]. \quad (5.86)$$

Змінимо напрям (z) у зовнішньому потоці зверху-вниз за напрямком потоку, тоді знак (-) перед v_z зміниться на (+). Перетворимо рівняння до вигляду, зручного для інтегрування з виносом r і z у різні частини:

$$r^3 dr = \frac{d^2 \rho C_0^2 r_*^4}{18\mu} \left[\frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{L_3} \right]^2 \left[\frac{\pi(r^2 - r_0^2)}{\left(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} \right)} dz + \frac{L_{20}(r^2 - r_0^2) r^3 \pi(r_0^2 - r_*^2) dz}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2) r \left[L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right]} \right],$$

$$r^3 dr = \frac{d^2 \rho C_0^2 r_*^4 \pi (r_0^2 - r_*^2)}{18 \mu \left(L_1 + \frac{L_{20}}{H} z \right)} \left[\frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{L_3} \right]^2 dz + \frac{L_{20} (r^2 - r_0^2) r^2 dz}{2H \left[L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right]} \quad (5.87)$$

Інтегрування окремих складових:

$$\int_r^{r_0} r^3 dr = \frac{r_0^4 - r^4}{4};$$

$$\int_0^H \frac{H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right)}{L_3^2} dz = \frac{L_{10} z + \frac{L_{20}}{H} \frac{z^2}{2}}{L_3^2} \Big|_0^H = \frac{L_{10} z + \frac{L_{20}}{H} H}{L_3^2} = \frac{H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right)}{L_3^2} \Big|_0^H =$$

$$\frac{L_{10} H + \frac{L_{20} H}{2}}{L_3^2} = \frac{H(L_{10} + L_{20})}{L_3^2};$$

$$\int_0^H \frac{dz}{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z} = \frac{1}{\frac{L_{20}}{H}} \ln \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right) \Big|_0^H = \frac{H}{L_{20}} \ln \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} \right) - \ln(L_{10}) = \frac{H}{L_{20}} \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}.$$

Підстановка результатів інтегрування в (5.88) приводить до виразу:

$$\frac{r_0^4 - r^4}{4} = d^2 \frac{\rho C_0^2 r_*^4 \pi (r_0^2 - r_*^2) H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right)}{18 \mu L_3^2} + \frac{(r_{cp}^2 - r_0^2) r_{cp}^2 \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}}{2 L_{10}}. \quad (5.89)$$

Розкладання $r_0^4 - r^4$, $r_0^2 - r_*^2$.

$$r_0^4 - r^4 = (r_0^2 - r^2)(r_0^2 + r^2) = (r_0 - r)(r_0 + r)(r_0^2 + r^2);$$

$$r_0^2 - r_*^2 = (r_0 - r_*)(r_0 + r_*).$$

$$\eta = \frac{r_0 - r}{r_0 - r_*} = d^2 \frac{2\pi \rho C_0^2 r_*^4 (r_0 + r_*) H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right)}{9\mu L_3^2 (r_0 + r_{cp})(r_0^2 + r_{cp}^2)} + \frac{(r_{cp}^2 - r_0^2) r_{cp}^2 \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}}{2(r_0 + r_{cp})(r_0^2 + r_{cp}^2)(r_0 - r_*)}. \quad (5.90)$$

Вираз $\frac{r_0 - r}{r_0 - r_*}$ є відношенням шляху, який треба пройти частинці, що влучила на орбіту з радіусом

$r_{cp} = \frac{r_0 + r_*}{2}$ до максимально можливого шляху. Очевидно, що таке відношення – середня ймовірність уловлення частинок, відповідних за своїми параметрами до даної орбіти $r = f(d)$. В експериментальних умовах, якщо даній частинці буде відповідати орбіта з радіусом r_* , вона буде відповідати наймінімальній фракційній ефективності. Якщо ж частинка буде відповідати орбіті з $r = r_0$, то і ймовірність уловлення буде 100 %.

Розрахунок ефективності у внутрішньому шарі.

У внутрішньому шарі діють сили відповідно до рівняння (5.83). Складові для внутрішнього шару також аналогічні:

$$\omega_1(z) = C_0 \left[\frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{L_3} \right]; \quad \omega = \omega_1(z); \quad v_{z1} = \frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2};$$

$$v_{r1} = -\frac{L_{20} z}{2\pi H r_*^2}. \quad (5.91)$$

Підстановка значень (5.91) в (5.83) приводить:

$$\frac{dr}{dt} = \frac{m\omega^2 r}{3\pi d\mu} + v_r. \quad (5.92)$$

З урахуванням $dt = \frac{dz}{v_z}$; $\frac{dr}{dt} = v_z \frac{dr}{dz}$;

$$v_z \frac{dr}{dz} = \frac{\frac{1}{6} \pi d^3 \rho \omega_1^2(z) r}{3\pi d\mu} - \frac{L_2 r}{2\pi H r_*}. \quad (5.93)$$

Підстановка значень замість $v_z, \omega_1(z)$:

$$\frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{\pi r_*^2} \frac{dr}{dz} = d^2 \rho C_0^2 \frac{\left(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right)^2}{L_3^2} - \frac{L_{20} r}{2\pi H r_*^2}. \quad (5.94)$$

Розділення перемінних приведе до рівняння:

$$\frac{dr}{r} = \pi r_*^2 C_0^2 \frac{d^2 \rho}{18\mu} \left[\frac{L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z}{L_3^2} \right]^2 - \frac{L_{20} dz}{2H \left[L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right]}. \quad (5.95)$$

Інтегрування складових:

$$\int_r^{r_*} \frac{dr}{r} = \ln \frac{r_*}{2} = \ln \frac{1}{1-\eta}. \quad (5.96)$$

Пояснення:

$$\frac{r_* - r}{r_*} = \eta; \quad 1 - \frac{r}{r_*} = \eta; \quad \frac{r}{r_*} = 1 - \eta; \quad \frac{r_*}{r} = \frac{1}{1-\eta}.$$

$$\int_0^H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right) dz = L_{10} H + \frac{L_{20}}{H} \frac{z^2}{2} \Big|_0^H = L_{10} H + \frac{L_{20}}{H} \frac{H^2}{2} = H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right);$$

$$\int_0^H \frac{dz}{\left(L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right)^2} = \frac{1}{L_{20}} \ln \left[L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z \right] \Big|_0^H = \frac{H}{L_{20}} [\ln(L_{10} + L_{20}) - \ln L_{10}] = \frac{H}{L_{20}} \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}. \quad (5.97)$$

Підстановка результатів інтегрування в (5.95) призводить до виразу:

$$\ln \frac{1}{1-\eta} = d^2 \frac{\pi \rho r_*^2 C_0^2 H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right)}{18\mu L_3^2} - \frac{L_{20}}{2H} \frac{H}{L_{20}} \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}. \quad (5.98)$$

Позначивши через A праву частину, отримаємо рівняння:

$$\ln \frac{1}{1-\eta} = A; \quad \eta = \frac{\exp A - 1}{\exp A}, \quad (5.99)$$

$$\text{де } A = d^2 \frac{\pi \rho r_*^2 C_0^2 H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right)}{18 \mu L_3^2} - \frac{1}{2} \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}. \quad (5.100)$$

Наведені рівняння, отримані на основі теоретичних знань руху частинок пилу в газі, як відомо, не можуть мати повного збігу з дійсними значеннями ефективності промислових пиловловлювачів. Тому вони були порівняні з даними промислових циклонних апаратів із визначенням коефіцієнтів кореляції. Були проведені порівняння теоретичних рівнянь з даними промислових випробувань модельних циклонів різних модифікацій [3].

Для зовнішнього шару розрахункове рівняння приведено до вигляду:

$$\eta_{cp2} = K_1 d^2 x_2 + K_2 y_2, \quad (5.101)$$

$$\text{де } x_2 = \frac{2 \pi \rho C_0^2 r_*^4 (r_0 + r_*) H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right)}{9 \mu L_3^2 (r_0 + r_{cp}) (r_0^2 + r_{cp}^2)};$$

$$y_2 = \frac{(r_{cp}^2 - r_0^2) r_{cp}^2 \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}}{2 (r_0 + r_{cp}) (r_0^2 + r_{cp}^2) (r_0 - r_*)}.$$

Аналогічно:

$$\eta_{cp1} = \frac{\exp A - 1}{\exp A}; \quad A = K_1 d^2 - K_2 y_2. \quad (5.102)$$

$$x_1 = \frac{\pi \rho r_*^2 C_0^2 H \left(L_{10} + \frac{L_{20}}{2} \right)}{18 \mu L_3^2};$$

$$y_1 = \frac{1}{2} \ln \frac{L_{10} + L_{20}}{L_{10}}. \quad (5.103)$$

Одержані значення коефіцієнтів K_1 і K_2 наведені у таблицях 5.3 і 5.4.

Таблиця 5.3

Коефіцієнти кореляції зовнішнього шару

| Марка циклона | K_1 | K_2 |
|---------------|-------|-------|
| ЦН-11 | 0,045 | 5,0 |
| ЦН-15 | 0,061 | 5,5 |
| ЦН-15У | 0,107 | 7,0 |
| ЦН-24 | 0,39 | 4,98 |

Таблиця 5.4

Коефіцієнти кореляції внутрішнього шару

| Марка циклона | K_1 | K_2 |
|---------------|--------|-------|
| ЦН-11 | 0,0861 | 1,29 |
| ЦН-15 | 0,117 | 1,47 |
| ЦН-15У | 0,277 | 2,2 |
| ЦН-24 | 0,58 | 1,238 |

5.6. Удосконалення моделей розрахунку конічних апаратів

Теоретичний аналіз відносно конічних циклонів виконується рідко у зв'язку зі складністю процесу. Використання для аналізу циліндричної системи координат призводить до складних і громіздких рівнянь. Використання сферичної системи координат дещо спрощує аналіз, але точність рівнянь нижча.

У даному розділі зроблено спробу отримати рівняння розрахунку фракційної ефективності конічних циклонів у циліндричній системі.

На рис. 5.4 показано схему дії конічного апарату із заданими геометричними і технологічними параметрами [81].

Газовий запилений потік з витратою L_{20} після завихривача рухається вниз біля корпусу 1. Внутрішня поверхня обертання спочатку приблизно дорівнює радіусу вихідної труби, потім зменшується до r_1 і повертає вгору, після відокремлення твердих частинок, які зсипаються через отвір 3 в бункер. Через нахил корпусу 1 газ входить у центральну зону поступово по всій висоті H .

Початковий радіус входження частинок у зону очищення позначений r_n . У середньому він дорівнює

$$r_n = \frac{r_0 + r_2}{r}. \text{ Відповідно середній радіус корпусу дорівнює}$$

$$r_k = \frac{r_1 + r_2}{r}. \text{ Рівняння сил, що діють у закрученому потоці:}$$

$$m\omega^2 r = 3\pi d\mu \left(\frac{dr}{dt} - v_z \right) \text{ аналогічно для циліндричних}$$

апаратів. Складові цього рівняння мають деякі відмінності:

$\frac{dr}{dt}$ – швидкість частинок пилу в напрямку радіуса r під

дією відцентрової сили, m/c ; $m = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_T$ – маса

частинки, $кг$; ω – кутова швидкість руху газу, $1/c$; d –

діаметр частинки, $м$; μ – в'язкість газу, $Па \cdot c$; r –

радіальна швидкість переміщення газу, $м/c$; ρ_T – густина

твердих частинок, $кг/м^3$.

Осьова і радіальна швидкості V_z і V_r пов'язані з витратою газу та іншими параметрами залежностей :

$$V_z = \frac{L_{20} \left(1 - \frac{z}{H} \right)}{\pi (r_k^2 - r_0^2)}; v_r = \frac{L_{20}}{2\pi r_0 H};$$

$$\frac{dr}{dt} = v_z \frac{dr}{dz}. \quad (5.104)$$

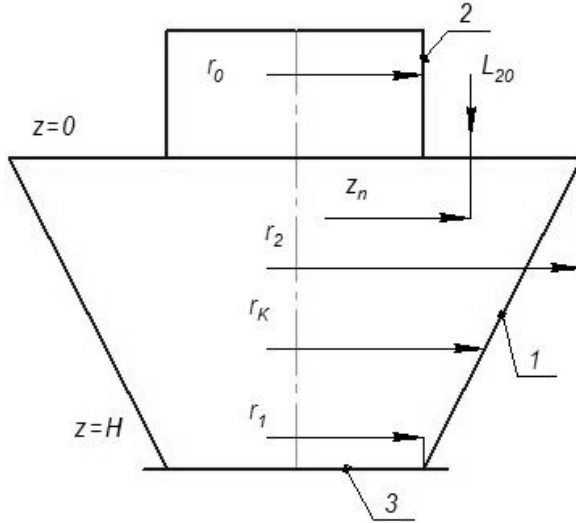


Рис. 5.4. Схема конічного циклона:
 1 – конічний корпус; 2 – вихід очищеного газу; 3 – отвір для пилу

Інші складові рівняння руху частинок визначено із рівняння нерозривності руху потоку та інших законів:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{L_{20}}{\pi(r_k^2 - r_0^2)H}. \quad (5.105)$$

Підстановка значень $\frac{\partial v_z}{\partial z}$ в рівняння нерозривності:

$$\frac{L_{20}}{\pi(r_k^2 - r_0^2)H} = \frac{1}{2} \frac{\partial(rv_r)}{\partial z}; \quad d(rv_r) = \frac{L_{20}rdr}{\pi(r_k^2 - r_0^2)H}.$$

Після інтегрування одержимо:

$$rv_r = \frac{L_{20}r^2}{2\pi(R_k^2 - R_0^2)H} + C.$$

При

$$r = r_k; v_r = 0; C = -\frac{r_k^2 \cdot L_{20}}{2\pi(R_k^2 - R_0^2)H};$$

$$rv_r = \frac{L_{20}r^2}{2\pi(R_k^2 - R_0^2)H} - \frac{L_{20}r_k^2}{2\pi(R_k^2 - R_0^2)H};$$

$$v_r = \frac{L_{20}(r^2 - r_k^2)}{2\pi(R_k^2 - R_0^2)Hr}. \quad (5.107)$$

Підстановка значень у рівняння руху частинки приведе:

$$\frac{dr}{dt} v_z = \frac{d^2 \rho_m \omega^2 r}{18\mu} + \frac{L_{20}(r^2 - r_k^2)}{2\pi(R_k^2 - R_0^2)Hr}. \quad (5.108)$$

Підстановка значення v_z у рівняння (5.108), а також значення ω із $\omega = \frac{v_0}{2r} \sqrt{\frac{r_k}{r}}$ (по Н.Л. Фуксу), де v_0 – швидкість газу на вході в циклон після проходження завихровувача, м/с [5], приведе:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{d^2 \cdot \rho_m v_0^2 R_k \pi (R_k^2 - R_0^2)}{18\mu 4r^2 L_{20} \left(1 - \frac{z}{H}\right)} + \frac{(r^2 - R_k^2) \pi (R_k^2 - R_0^2)}{2\pi (R_k^2 - R_0^2) Hr \left(1 - \frac{z}{H}\right)} \quad (5.109)$$

Зауважимо, що $r_k = r_2 - z \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$, тоді після розділення перемінних:

$$\frac{dr}{dz} = \frac{d^2 \cdot \rho_m v_0^2 \cdot \pi r_2 (r_2 - r_0) H}{72\mu L_{20} (H - z) r^2} + \frac{r}{2(H - z)} - \frac{r_2^2}{2(H - z)r}. \quad (5.110)$$

На початку руху $r = r_n$;

$$r'(0) = \frac{\pi \rho_m d^2 v_0^2 \cdot r_2 (r_2^2 - r_0^2) H}{72\mu L_{20} H \cdot r_n^2} + \frac{r_n}{2n} - \frac{r_2^2}{2Hr_n}. \quad (5.111)$$

Значення r можна подати у вигляді ряду Маклорена:

$$r = r_n + r'(0) + \frac{r_0''}{r!} z^2 + \frac{r_0'''}{3!} z^3. \quad (5.112)$$

У першому наближенні будемо враховувати тільки першу похідну $r'(0)$, бо інші – $r_0'' \text{ та } r_0'''$, мало збільшують точність.

Проінтегруємо $\int_{r_n}^{r_k} dr = r_k - r_n$ та визначимо також

значення ефективності вловлення частинок пилу в кінцічному циклоні:

$$\eta_{cp} = \frac{r_k - r_n}{r_k - r_0} = \frac{r_n + r'(0)z}{r_k - r_0}. \quad (5.113)$$

Проведемо розрахунки середньої ефективності для циклону СДК-ЦН-33.

Параметри циклону :

$$r_r = 0,15 \text{ м}, r_0 = 0,055 \text{ м}, r_1 = 0,005 \text{ м}, H = 0,9 \text{ м}, L_{20} = 500 \text{ м}^3 / \text{год}, v_0 = 11 \text{ м} / \text{с}, \rho_m = 2670 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

Розрахуємо необхідні параметри :

$$r_n = \frac{r_0 + r_2}{2} = \frac{0,055 + 0,15}{2} = 0,1025 \text{ м};$$

$$r_k = r_{c0} = \frac{r_1 + r_2}{2} = \frac{0,05 + 0,15}{2} = 0,1 \text{ м};$$

$$r'(0) = \frac{d^2 \cdot 3,14 \cdot 26701 \text{ г} \cdot 0,15 \cdot 0,0195 \cdot 3600}{72 \cdot 0,018 \cdot 10^{-3} \cdot 500 \cdot 0,0105} + \frac{0,1025}{2 \cdot 0,9} \cdot \frac{0,0225}{2 \cdot 0,9} - \frac{0,0225}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,1025} = d^2 \cdot 1,57 \cdot 10^9 - 0,065;$$

$$r'(0) = d^2 \cdot 1,57 \cdot 10^9 - 0,065.$$

$$\eta_{cp} = \frac{(d^2 \cdot 1,57 \cdot 10^9 - 0,65)H}{r_k - r_0} = d^2 \cdot 3,49 \cdot 10^{10} - 1,3. \quad (5.114)$$

У таблиці 5.5 наведені теоретичні значення ефективності в порівнянні з експериментально-промисловими даними НДІОГАЗ.

Таблиця 5.5

**Порівняння ефективності η_{cp} уловлення
частинок, розраховане теоретично та
експериментально**

| <i>d, мкм</i> | 1,6 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 | 9,0 |
|--|----------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----|-------|------|
| $\eta_m, \%$ за теорію | - 121 | - 116 | - 99,6 | - 79,2 | - 42,78 | - 4,36 | +91 | +93,4 | +152 |
| $\eta_e, \%$ з експе- римен- ту | +55 | +65 | +77 | +85 | +90 | +92 | +94 | +95,5 | +96 |

Для проведення теоретичних розрахунків у відповідність до експериментальних даних були встановлені коефіцієнти кореляції k_1 та k_2 .

Розраховувалися (k) для двох діапазонів діаметрів: $5 \text{ мкм} > d > 1 \text{ мкм}$ та $9 \text{ мкм} > d > 5 \text{ мкм}$.

Середнє значення коефіцієнтів кореляції для I-го діапазону: $k_1 = 0,438; k_2 = -0,389$, для II-го діапазону: $k_1 = 0,03; k_2 = -0,634$.

Розрахунки ефективності за напівемпіричними рівняннями з урахуванням коефіцієнтів k_1 та k_2 :

$$\eta = k_1 d^2 \cdot 3,49 \cdot 10^{-10} - 1,3k_2. \quad (5.115)$$

Порівняння напівемпіричних показників з експериментальними показниками циклонів ДК-ЦН-33 наведені в таблиці 5.6.

**Порівняльна характеристика ефективності
пиловловлювання частинок**

| <i>d</i> , мкм | 1,6 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | 6,0 | 7,0 | 8,0 |
|---|------|-----|------|-------|-------|------|-------|------|
| η_{cp} напівтео ретичне, % | 59,0 | 63 | 80,2 | 101,5 | 132,7 | 32,6 | 14,0 | 95,6 |
| η_{cp} експери ментальне, % | 55,0 | 65 | 77,0 | 85,0 | 90,0 | 92,0 | 94,0 | 95,5 |
| Середня похибка розрахунків , Δ , % | 7,43 | 1,8 | 4,2 | 28,8 | 47,4 | 64,4 | 0,054 | 0,13 |

**5.7. Розрахунок втрати тиску в апаратах із
зустрічними закрученими потоками**

Втрати тиску у відцентрових пиловловлювачах розраховуються у більшості випадків за емпіричними залежностями з використанням коефіцієнтів опору, величина яких визначається відповідно до дослідних даних експлуатації або експериментальних досліджень. Такий метод є досить виправданим для стандартних пиловловлювачів, які у промисловості виготовляються серійно.

Теоретичний метод розрахунку втрат тиску циклонних пиловловлювачів був уперше використаний В. Бартом у Німеччині [82, 83]. Він був рекомендований до використання на основі проведених власних експериментальних і емпіричних коефіцієнтів з визначенням характерних швидкостей руху потоку. Такий підхід дещо викривляє суть теоретичного методу.

Автором із аспірантами [61-63] був розроблений метод розрахунку полів швидкостей у вихровій камері, який дозволив використати його для розрахунку втрат

тиску в апаратах із зустрічними потоками. Однак новий підхід є достатньо трудомістким і не дає точного прогнозування дійсних втрат. У подальшому був запропонований спрощений метод розрахунку полів швидкостей, використання якого в даному розділі дозволив суттєво спростити розрахунки втрат тиску, а також більш однозначно визначити їх дійсні значення для складних апаратів із зустрічними закрученими потоками. Схема АЗЗП подана на рис. 5.5.

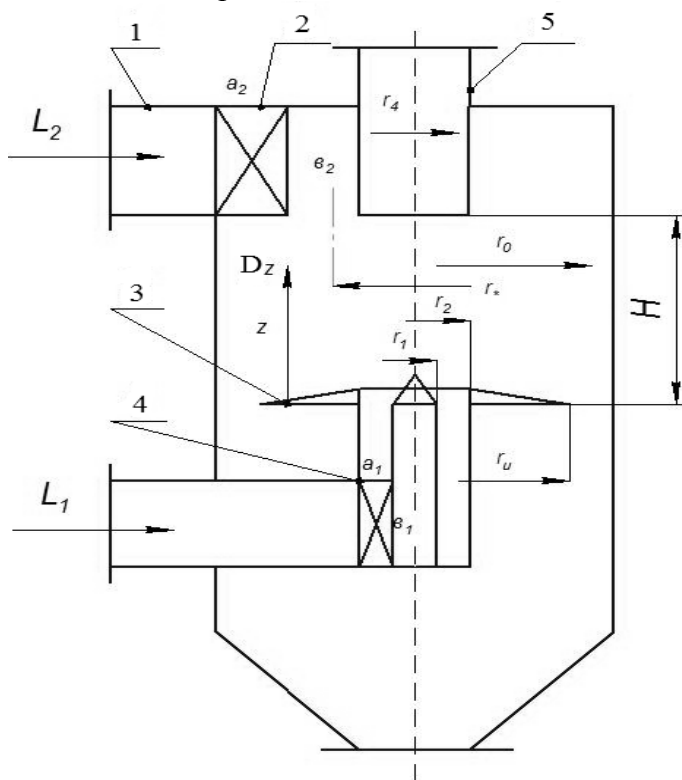


Рис. 5.5. Схема АЗЗП.

Концепція В. Барта складається в розрахунку загального опору як складового:

а) вхідного опору від завихривача до центрального вихору;

б) на виході з апарату – від нижнього завихривача до вхідної труби.

Математичні залежності представлені для кожної складової опору:

$$\Delta p_{ex} = \frac{\rho}{2} \left[\frac{u_a^2 r_a}{r_i} - \frac{u_i^2 r_i}{2} + u_i^2 \right], \quad (5.116)$$

$$\Delta p_{вих} = \frac{\rho}{2} v_i^2 \left[K \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right], \quad (5.117)$$

де u – тангенціальна швидкість, м/с; v – осьова швидкість, м/с; i – швидкість у вихідній центральній зоні, м/с; a – швидкість на поверхні корпусу, м/с; e – швидкість у вхідному патрубку, м/с; K – коефіцієнт ($K=4,4$ – для циліндричного апарату із тангенціальним входом; $K=3,4$ – для уліточного входу).

Методику розрахунку В. Барта з використанням методу розрахунку поля швидкостей автора [65, 66, 82, 83] викладено на прикладі розрахунку втрат тиску лабораторного АЗЗП діаметром до 0,15 м з наступними параметрами:

$$r_a = r_0 = 0,075 \text{ м}; r_1 = 0,015 \text{ м};$$

$$r_4 = r_* = r_i = 0,045 \text{ м}; H = 0,12 \text{ м};$$

$$a_2 \times b_2 = 60 \times 20; a_1 \times b_1 = 0,03 \times 0,02 \text{ м};$$

$$r_2 = 0,05 \text{ м}; r_3 = 0,05 \text{ м}; \text{загальні витрати запиленого}$$

$$\text{газу } L_1 = 50 \text{ м}^3 / \text{год}; L_2 = 100 \text{ м}^3 / \text{год};$$

$$L_3 = 150 \text{ м}^3 / \text{год}.$$

5.7.1. Розрахунки опору у вторинному потоці

У відповідності до дослідів Л.І. Гудима [64] загальний опір АЗЗП визначається складовими коефіцієнтами опору у випадку проходження всього

потоків по кожному із насосів окремо. Складові зовнішнього і внутрішнього потоків ($L_{10} + L_{20}$) визначимо із середнього показника роздвоєності потоку в протитечних та прямоточних апаратах $K_\varepsilon = 0,35$. Тоді:

$$L_3 = 150 \text{ м}^3 / \text{год} = 4,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$L_2 = 100 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,0278 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$L_1 = 50 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,0159 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Вхідний момент кількості руху у вторинному потоці:

$$M_{\text{вх}2} = \frac{2}{3} \rho_2 v_{e2} L_2 \frac{r_0^3 - r_3^3}{r_0^2 - r_3^2};$$

$$v_{e2} = \frac{L_2}{a_2 b_2} = \frac{0,0278}{0,06 \cdot 0,02} = 23,1 \text{ м} / \text{с};$$

$$r_0^3 - r_3^3 = 0,075^3 - 0,05^3 = 0,000297 \text{ м}^3;$$

$$r_0^2 - r_3^2 = 0,075^2 - 0,05^2 = 0,003125 \text{ м}^2;$$

$$M_{\text{вх}2} = \frac{2}{3} 1,21 \cdot 23,1 \cdot 0,0278 \frac{0,000297}{0,003125} = 0,0492 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Характеристична швидкість у глушнику:

$$C_0 = \frac{2M_{\text{вх}}}{L_3 \rho_2 r_4^2} = \frac{2 \cdot 0,0492}{0,0278 \cdot 1,21 \cdot 0,045^2} = 1444,6 \text{ с}^{-1}.$$

Тангенційні швидкості на межі розділення потоків:

$$r_x = r_i = r_4 = 0,045 \text{ м}.$$

$$u_i(z) = \omega_1(z) r_i; \quad \omega_1(z) = C_0 \frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}}{L_{20}}, \quad (5.118)$$

де $L_{10} = L_2(1 - K_\varepsilon)$; $L_{20} = K_r L_2$; K_ε – коефіцієнт роздвоєності потоку; середнє значення $K_r = 0,35$.

$L_{10} = 0,68 \cdot 100 = 68 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,018 \text{ м}^3 / \text{с}$ – потік доходить до шайби без зміни потоків і піднімається вгору, складаючи основу вихідного потоку;

$L_{20} = 0,35 \cdot 100 = 35 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,0972 \text{ м}^3 / \text{с}$ – потік,
який поступово переходить у внутрішній.

$$\omega_1(z=0) = C_0 \frac{L_{10}}{L_2} = 1444,6 \frac{0,018}{0,0278} = 935,35 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_1(z=H) = C_0 \frac{L_{10} + L_{20}}{L_2} = C_0 \cdot 1 = 1444,6 \text{ с}^{-1};$$

$$u_1(z=0) = 935,35 \cdot 0,045 = 42,1 \text{ м} / \text{с};$$

$$u_1(z=H) = 1444,6 \cdot 0,045 = 65 \text{ м} / \text{с}.$$

Осьові швидкості у внутрішньому шарі:

$$z=0; L_1(z) = L_{20} = 0,018 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$z=H; L_1(H) = L_{10} + L_{20} = 0,0278 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$v_{i2}(z=0) = \frac{4L_1(z=0)}{\pi d_4^2} = \frac{4 \cdot 0,018}{3,14 \cdot 0,045^2} = 11,3 \text{ м} / \text{с};$$

$$v_{i2}(z=H) = \frac{4L_1(H)}{\pi d_4^2} = \frac{4 \cdot 0,0278}{3,14 \cdot 0,045^2} = 17,49 \text{ м} / \text{с}.$$

Середня осьова швидкість у внутрішньому потоці:

$$v_{icp2} = \frac{11,3 + 17,49}{2} = 14,39 \text{ м} / \text{с}.$$

Відношення швидкостей:

$$\frac{u_{icp2}}{v_{icp2}} = \frac{53,54}{14,39} = 3,72.$$

Тангенційні швидкості на поверхні апарату:

$$u_{1a2}(z) = \omega_1(z) \frac{r_i^2}{r_a}; \quad (5.119)$$

$$z=0; u_{a2}(0) = 935,35 \cdot \frac{0,045^2}{0,025} = 25,25 \text{ м} / \text{с};$$

$$z=H; u_{a2}(H) = 1444,6 \cdot \frac{0,045^2}{0,078} = 39 \text{ м} / \text{с};$$

$$u_{\text{аср2}} = \frac{39 + 25,25}{2} = 32,12 \text{ м / с.}$$

Осьові швидкості:

$$v_a(H) = \frac{4L_2}{\pi(D_0^2 - d_3^2)} = \frac{4 \cdot 0,0278}{3,14 \cdot (0,15^2 - 0,05^2)} = 1,77 \text{ м / с; (5.120)}$$

$$v_a(z=0) = \frac{L_4 L_{10}}{\pi(D_0^2 - d_3^2)} = \frac{4 \cdot 0,018}{3,14(0,15^2 - 0,05^2)} = 1,147 \text{ м / с. (5.121)}$$

Середня швидкість:

$$v_{\text{аср2}} = \frac{1,77 + 1,147}{2} = 1,46 \text{ м / с.}$$

Втрати тиску на вході:

$$\Delta P_{\text{вх}} = \frac{\rho}{2} \left[\frac{U_a^2 r_a}{r_i} - \frac{U_i^2 r_i}{r_a} + U_i^2 \right] = \frac{1,21}{2} \left[\frac{32,12^2 \cdot 0,075}{0,045} - \frac{53,54^2 \cdot 0,045}{0,075} + 53,54^2 \right] = 1734,25 \text{ Па. (5.122)}$$

Втрати тиску на виході:

$$\Delta P_{\text{вих}} = \frac{\rho}{2} v_i^2 \left[K \left(\frac{U_i}{v_i} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{U_i}{v_i} \right)^2 \right] = 4897,56 \text{ Па (при } K=4,4 \text{ –}$$

для циліндричних апаратів).

Загальний опір у вторинному потоці:

$$\Delta P_2 = \Delta P_{\text{вх2}} + \Delta P_{\text{вих2}} = 1734,25 + 4897,56 = 6631,8 \text{ Па. (5.123)}$$

5.7.2. Розрахунки опору у первинному потоці

Складові зовнішнього і внутрішнього потоків:

$$L_1 = 50 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,0139 \text{ м}^3 / \text{с.}$$

Витрати газу у пристінній частині:

$$L_{20} = \frac{L_{20}(D_0^2 - d_2^2)}{D_0^2} = \frac{0,0139(0,15^2 - 0,1^2)}{0,15^2} = 0,00772 \text{ м}^3 / \text{с. (5.124)}$$

Витрати газу у приосьовій частині:

$$L_{10} = \frac{L_1 dz}{d_0^2} = \frac{0,0139 + 0,01}{0,0298} = 0,00618 \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (5.125)$$

Загальні витрати:

$$L_1 = L_{10} + L_{20} = 0,00618 + 0,00772 = 0,139 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Зміна витрат газу L_{10} і L_{20} при проходженні висоти від $z=0$ до $z=H$:

$$L_{10}(z) = L_{10} + \frac{L_{20}}{H} z; L_{20}(z) = L_{20} - \frac{L_{20}}{H} z;$$

$$z = H; L_1(H) = L_{10} + L_{20} = 0,0139 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$L_{10}(z = 0) = L_{10} = 0,00618 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$L_{20}(z = 0) = L_{20}; L_{20}(z = H) = 0.$$

Характеристична кутова швидкість:

$$C_0 = \frac{2M_{\text{ex1}}}{L_1 \rho r_4^2}; M_{\text{ex1}} = \frac{2}{3} \rho v_{cp1} L_1 \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2};$$

$$r_2^3 - r_1^3 = 0,05^3 - 0,015^3 = 12,66 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

$$r_2^2 - r_1^2 = 0,05^2 - 0,015^2 = 0,002275 \text{ м}^2;$$

$$v_{cp1} = \frac{L_1}{a_1 b_1} = \frac{0,0139}{0,03 \cdot 0,02} = 23,12 \text{ м} / \text{с};$$

$$M_{\text{ex1}} = \frac{2}{3} 1,21 \cdot 23,17 \cdot 0,0139 \frac{12,16 \cdot 10^{-5}}{0,002275} = 0,0139 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$C_0 = \frac{2 \cdot 0,0139}{0,0139 \cdot 1,21 \cdot 0,045^2} = 816,24 \text{ с}^{-1}.$$

Тангенціальні швидкості на межі розділення потоків:

$$u_i(z) = \omega_1(z) r_i; \omega_1(z) = C_0 \frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}}{L_1};$$

$$\omega_1(z = H) = C_0 = 816,24 \frac{1}{\text{с}};$$

$$u_1(z=H) = \omega_1(H)r_i = 816,24 \cdot 0,045 = 36,73 \text{ м / с};$$

$$\omega_1(z=0) = 816,24 \frac{L_{10}}{L_1} = 816,24 \frac{0,00618}{0,0139} = 365,5 \frac{1}{\text{с}};$$

$$u_{i1}(z=0) = \omega_1(z=0)r_i = 365,5 \cdot 0,045 = 16,44 \text{ м / с}.$$

Середня швидкість на межі розділення потоків:

$$u_{icp1} = \frac{36,73 + 16,44}{2} = 26,5 \text{ м / с}.$$

Осьові швидкості у внутрішньому шарі:

$$v_i = \frac{uL_1(z)}{\pi D_i^2}; L_1(z) = L_{10} + L_{20} \frac{z}{H};$$

$$z=0; L_1(z) = L_{10} = 0,00618 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$z=H; L_1(H) = L_{10} + L_{20} = 0,0139 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$v_i(z=0) = \frac{4 \cdot 0,00618}{3,14 \cdot 0,045^2} = 3,18 \text{ м / с};$$

$$v_i(z=H) = \frac{4 \cdot 0,0139}{3,14 \cdot 0,045^2} = 7,083 \text{ м / с};$$

$$v_{icp1} = \frac{3,15 + 7,083}{2} = 5,1 \text{ м / с};$$

$$\frac{u_{icp1}}{v_{icp1}} = \frac{26,6}{5,1} = 5,2.$$

Тангенціальні швидкості на поверхні апарата:

$$u_a(z) = \omega_1(z) \frac{r_i^2}{r_a};$$

$$u_a(H) = 816,24 \frac{0,045^2}{0,075} = 22,04 \text{ м / с};$$

$$u_a(0) = \omega_1(z=0) \frac{r_i^2}{r_a} = 365,5 \frac{0,045^2}{0,075} = 9,87 \text{ м / с};$$

$$u_{acp1} = \frac{22 + 9,87}{2} = 15,94 \text{ м / с}.$$

Осьові швидкості на поверхні апарата:

$$v_a(H) = \frac{4L_{20}}{\pi D_0^2} = \frac{4 \cdot 0}{3,14 \cdot 0,15^2} = 0;$$

$$v_a(z=0) = \frac{4L_{20}}{\pi D_0^2} = \frac{4 \cdot 0,00772}{3,14 \cdot 0,15^2} = 4,37 \text{ м / с}.$$

Середня швидкість на поверхні апарата:

$$v_{\text{ср1}} = \frac{4,32 + 0}{2} = 2,185 \text{ м / с}.$$

Втрати тиску при вході потоку, $L_1 = 0,0139 \text{ м}^3 / \text{с}$.

$$\Delta p_{\text{вх1}} = \frac{\rho}{2} \left[\frac{u_a^2 r_a}{r_i} - \frac{u_i r_i}{r_a} + u_i^2 \right] = \frac{1,21}{2} \left[\frac{15,94^2 \cdot 0,075}{0,045} - \frac{26,6 \cdot 0,045}{0,075} + 26,6^2 \right] = 427,39 \text{ Па}.$$

Втрати тиску при виході потоку:

$$\Delta p_{\text{вих1}} = \frac{\rho}{2} v_i^2 \left[K \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right]; \quad (5.126)$$

$$K = 4,4; \frac{u_i}{v_i} = 5,2; v_i = 5,1 \text{ м / с};$$

$$\Delta p_{\text{вих1}} = \frac{1,21}{2} 5,1^2 \left[4,4 \cdot 5,2^{\frac{4}{3}} + 5,2^2 \right] = 1048,25 \text{ Па};$$

$$\Delta p_1 = \Delta p_{\text{вх1}} + \Delta p_{\text{вих1}} = 427,39 + 1048,25 = 1475,64 \text{ Па}.$$

Загальні витрати тиску при подачі двох потоків

$$L_1 = 0,0139 \text{ м}^3 / \text{с} \quad \text{і}$$

$$L_2 = 0,0278 \text{ м}^3 / \text{с};$$

$$\Delta p_m = \frac{1}{1 + \varepsilon} (\Delta p_1 + \varepsilon \Delta p_2) = \frac{1}{1 + 2} (1475,64 + 2 \cdot 6631,8) = 4913,08 \text{ Па}$$

Експериментальні втрати в АЗЗП:

$$\Delta P_{ексн} \sum_{ексн} \frac{v_a^2}{2} \rho = 118 \cdot 1,21 \frac{2,36^2}{2} = 387,5 \text{ Па};$$

$$u_a = \frac{L_1 + L_2}{0,785 \cdot D_0^2} = \frac{0,0139 + 0,0278}{0,785 \cdot 0,15^2} = 2,36 \text{ м / с (5.127)}$$

Коефіцієнт перерахунку теоретичних показників у дійсні:

$$K = \frac{\Delta P_{ексн}}{\Delta P_m} = \frac{387,5}{4913,8} = 0,079. \quad (5.128)$$

5.7.3. Розрахунки втрат тиску в протитечних пиловловлювачах-циклонах. Циліндричні циклони

Гідравлічний опір відцентрових пиловловлювачів-циклонів здебільшого розраховують емпіричним методом з використанням дослідних даних у вигляді коефіцієнтів опору. Такий підхід прийнятний для поширеного класу циклонів, які виготовляються серійно [1-3, 7, 9, 11]. Але він мало прийнятний для нових конструкцій циклонів.

Метод теоретичного розрахунку опору був уперше розроблений німецьким науковцем Вольтером Бартом у середині ХХ сторіччя, але довго не використовувався в розрахунковій практиці, оскільки на той час не були розроблені методи розрахунку полів швидкості, значення яких потрібно використовувати в методі В. Барта [82, 83].

Останнім часом розроблені такі методи розрахунку структури потоків, використання яких, поряд з методом В. Барта, може дати дуже простий, надійний і точний метод розрахунку опору циклонів.

Рівняння В. Барта для розрахунку опору циклонів:

$$\Delta p_{ex} = \frac{\rho}{2} \left[\frac{u_a^2 r_a}{r_i} - \frac{u_i^2 r_i}{r_a} + u_i^2 \right], \quad (5.129)$$

$$\Delta p_{\text{вих}} = \frac{\rho}{2} u_i^2 \left[K \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{u_i}{v_i} \right)^2 \right]. \quad (5.130)$$

де Δp_{ex} $\Delta p_{\text{вих}}$ – складові опору циклону на вході (вхідний штуцер і зовнішній шар) та на виході (внутрішній шар і вихідна труба); u – тангенціальна швидкість, м/с; v – осьова швидкість, м/с; a – на стінках циклону; i – на межі розділу потоків; e – у вхідному патрубку; K – коефіцієнт.

Розрахунок поля швидкостей у циклоні:

- тангенціальна швидкість у зовнішньому шарі:

$$u_2 = \omega_1(z) \frac{r_a^2}{2}; r_a > r > r_i; \quad (5.131)$$

- у внутрішньому шарі:

$$u_1 = \omega_1(z) r_i; r_i > r > 0, \quad (5.132)$$

де $\omega_1 \left(z = C_0 \frac{L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}}{L_3} \right)$ – кутова швидкість у

довільному перерізі циклону;

$L_{10} = L_3(1 - K_\varepsilon)$ – величина втрат частки потоку до

повороту вгору;

$L_{20} = L_3 K_\varepsilon$ – частина потоку, яка поступово

змішується із внутрішнім шаром; $C_0 = \frac{2M_{\text{ex}}}{\rho L r_i^2}$ –

характеристична кутова швидкість на початку вихідної

труби; $M_{\text{ex}} = \frac{2}{3} \rho L_3 v_e \frac{r_a^3 - r_3^3}{r_a^2 - r_3^2}$ – вхідний момент кількості

руху, м³/с.

Осьові швидкості.

У внутрішньому шарі:
$$v_1 = \frac{L_1(z)}{\pi r_i^2}. \quad (5.133)$$

У зовнішньому шарі:
$$v_2 = \frac{L_2(z)}{\pi(r_a^2 - r_i^2)}; \quad (5.134)$$

$$L_2(z) = L_1(z) = L_{10} + L_{20} \frac{z}{H}.$$

Метод визначення опору циклонів показано на прикладі розрахунку опору циклону типу ЦП-15 діаметром $D = 1,9 \text{ м}$.

Вхідні конструктивні технологічні параметри циклону:

$$r_a = 0,95 \text{ м}; r_i = r_4 = 0,56 \text{ м}; H = 5,4 \text{ м}; r_3 = 0,6 \text{ м};$$

$$a \times b = 1,28 \times 0,35 \text{ м}; L_3 = 30000 \text{ м}^3 / \text{год} = 8,33 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Швидкість у вхідному патрубку:

$$v_e = \frac{L}{ab} = \frac{30000}{3600 \cdot 1,25 \cdot 0,35} = 19 \text{ м} / \text{с}. \quad (5.135)$$

Вхідний момент кількості руху:

$$M_{\text{вх}} = \frac{2}{3} 1,21 \cdot 8,33 \cdot 19 \frac{0,641375}{0,5425} = 151 H \cdot \text{м},$$

$$C_0 = \frac{2 \cdot 151}{1,21 \cdot 8,33 \cdot 0,56^2} = 95,54 \frac{1}{\text{с}}.$$

Тангенціальні швидкості на поверхні корпусу циклону:

$$\omega_1(z) = 95,54 \frac{5,4 + 2,92 \frac{z}{H}}{8,33};$$

$$L_{10} = 8,33(1 - 0,35) = 8,4145 \text{ м}^3 / \text{с}; L_{20} = 8,33 \cdot 0,35 = 2,9155 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

$$\text{Переріз: } z = H; \omega_1(H) = C_0 = 95,54 \frac{1}{\text{с}};$$

$$z = 0; \omega_1(0) = 95,54 \frac{5,4}{8,33} = 61,93 \frac{1}{c};$$

$$z = 0; u_a = \omega_1(0) \frac{r_i^2}{r_a} = 61,93 \frac{0,56^2}{0,95} = 20,44 \text{ м/с};$$

$$z = H; u_a = \omega_1(H) \frac{r_i^2}{r_a} = 95,54 \frac{0,56^2}{0,95} = 31,54 \text{ м/с}.$$

$$\text{Середня швидкість: } u_{\text{ср2}} = \frac{31,54 + 20,44}{2} = 26 \text{ м/с}.$$

Швидкість на межі розділення потоків $u_i = u_*$.

$$\text{Переріз } z = H; u_i = \omega_1(H) r_i = 95,54 \cdot 0,56 = 33,55 \text{ м/с};$$

$$z = 0; u_i = 61,93 \cdot 0,56 = 34,68 \text{ м/с}.$$

$$\text{Середня швидкість } u_{\text{ср1}} = \frac{33,55 + 34,68}{2} = 44,1 \text{ м/с}.$$

Осьові швидкості у внутрішньому шарі:

$$v_{il} = \frac{L_1(z)}{\pi r_i^2}; L_1(z) = L_{10} + L_{20} \frac{z}{H};$$

$$v_{il}(z = 0) = \frac{5,4145}{3,14 \cdot 0,56^2} = 5,5 \text{ м/с}; \quad (5.136)$$

$$v_{il}(z = H) = \frac{8,33}{3,14 \cdot 0,56^2} = 8,46 \text{ м/с}.$$

$$\text{Середня швидкість: } v_{\text{ср1}} = \frac{5,5 + 8,46}{2} = 6,98 \text{ м/с}.$$

Відношення тангенційної швидкості до осьової:

$$\frac{u_{\text{ср1}}}{v_{\text{ср1}}} = \frac{44,1}{6,98} = 6,3.$$

Вхідні витрати тиску:

$$\Delta p_{\text{вх}} = \frac{1,21}{2} \left[\frac{26^2 \cdot 0,95}{0,56} - \frac{44,1^2 \cdot 0,56}{0,95} + 44,1^2 \right] = 1176,8 \text{ Па}.$$

Вихідні витрати тиску:

$$\Delta p_{\text{вих}} = 1,21 \frac{44,1}{2} \left[4,4 \cdot 6,3^{\frac{4}{3}} + 6,3^2 \right] = 2416 \text{ Па} .$$

Розрахункові (теоретичні) значення втрат тиску:

$$\Delta p_m = \Delta p_{\text{вх}} + \Delta p_{\text{вих}} = 1176,8 + 2416,4 = 3593,2 \text{ Па} .$$

Для порівняння теоретичного значення опору циклону розрахуємо Δp по загальноприйнятому емпіричному методу за допомогою коефіцієнта $\xi = 163$ для ЦП-15 [1,2,3].

$$\Delta p_e = \xi_{\text{ц}} \cdot \rho \frac{w_4^2}{2} = 163 \cdot 1,21 \cdot \frac{2,94}{2} = 568,26 \text{ Па} ; \quad (5.137)$$

$$w_4 = \frac{4L_3}{\pi D_0^2} = \frac{4 \cdot 30000}{3600 \cdot 3,14 \cdot 1,9^2} = 2,94 \text{ м/с} . \quad (5.138)$$

Коефіцієнт перерахунку теоретичних витрат тиску в дійсності:

$$K = \frac{568,26}{3593,2} = 0,158 .$$

5.7.4. Розрахунки втрат тиску в конічних циклонах

Рівняння В. Барта для конічних циклонів тотожні до циліндричних апаратів для проведення розрахунків полів швидкостей для внутрішнього і зовнішнього шарів. На рис. 5.3 наведено параметри конічного циклона та його ескіз.

Параметри конічного циклону:

$$L_3 = 130 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,036 \text{ м}^3 / \text{с}; K_r = 0,35; H = 0,3 \text{ м};$$

$$a_2 \times b_2 = 90 \times 20; r_a = 0,05 \text{ м}; r_3 = 0,03 \text{ м}; r_4 = 0,028 \text{ м};$$

$$\text{tg} \alpha_1 = \text{tg} \alpha_* = 6,2^0; r_{z'} = R_{\text{max}} \cdot \text{tg} 6,2 = 0,335 \cdot 0,097698 = 0,0327 = 0,033 \text{ м};$$

$$r_5 = r_0 - e; \frac{e}{H} = \text{tg} \theta_0; e = H \text{tg} \alpha_0 = 0,03 \text{ м}; r_5 = 0,02 \text{ м} .$$

Швидкість у вхідному патрубку:

$$v_e = \frac{130}{3600 \cdot 0,09 \cdot 0,02} = 20 \text{ м / с ;}$$

$$r_{i5} = R_{\min} \cdot \text{tg} 6,2 = 0,013 \text{ м .} \quad (5.139)$$

Тангенціальні швидкості.

$$\text{Зовнішній шар: } u_2 = \omega_1(z) \frac{r_{*z}^2}{r}, \quad (5.140)$$

де $\omega(z)$ – кутова швидкість у перетині z [63].

$$\omega_1(z) = C_0 \frac{r_{*y}}{r_{*z}^2} \left[1 + \frac{K_r}{H(r_{*y} + r_{*z})} (2 \cdot r_{*5} (z - H)) + \text{tg} \alpha_* (z^2 - H^2) \right]. \quad (5.141)$$

Вхідний момент кількості руху:

$$M_{\text{ex}} = \frac{2}{3} \rho L v_e \frac{r_a^3 - r_3^3}{r_a^2 - r_3^2}, \quad (5.142)$$

де $r_a = r_0$ – радіус стінки апарата; $r_3 = 0,03 \text{ м}$;

$$r_a^3 - r_3^3 = (0,05^3 - 0,03^3) = 0,000018 \text{ м}^3 ;$$

$$r_a^2 - r_3^2 = (0,05^2 - 0,03^2) = 0,0016 \text{ м}^2 ;$$

$$M_{\text{ex}} = \frac{2}{3} 1,21 \cdot 0,036 \cdot 20 \cdot \frac{0,000018}{0,0016} = 0,0357 H \cdot \text{м} ;$$

$$C_0 = \frac{2M_{\text{ex}}}{\rho L_3 r_4^2} = \frac{2 \cdot 0,0357}{1,21 \cdot 0,036 \cdot 0,028^2} = 2090 \frac{1}{\text{с}} ;$$

$$r_{*y} = \frac{r_3 + r_4}{2} = \frac{30 + 28}{2} = 0,029 \text{ м} ;$$

$$r_{*5} = 0,0129 \text{ м}; r_{*5} = 0,02 \text{ м}; \text{tg} \alpha_* = \text{tg} 6,2 = 0,0977 .$$

$$z = H; \omega_1(z) = C_0 \frac{r_{*y}^2}{r_{*z}^2}; r_{*y} = r_{*z} = r_* = 29 \text{ мм} ;$$

$$\omega(H) = C_0 = 2090 \frac{1}{\text{с}} ;$$

$$z = 0; \omega_1(z = 0) =$$

$$= C_0 \frac{0,0292}{0,0129^2} \left\{ 1 + \frac{0,35}{0,2(0,029 + 0,0129)} + 2 \cdot 0,0129(-0,2) + 0,977(-0,2^2) \right\} = 9501,7 \frac{1}{\text{с}} .$$

Тангенціальні швидкості на стінки апарата:

$$z = H; u_{\text{тан}} = \omega_1(H) \cdot r_*^2 = 2090 \cdot \frac{0,0212}{0,05} = 35,13 \text{ м / с};$$

$$z = 0; u_{\text{тан}} = \omega_1(z=0) \frac{r_*^2}{r_5} = 9501,68 \cdot \frac{0,0129^2}{0,02} = 79 \text{ м / с}.$$

Середня швидкість на стінки апарата:

$$u_{\text{ср}} = \frac{35,13 + 79}{2} = 57 \text{ м / с}.$$

Тангенційні швидкості на межі розділення потоків:

$$z = H; u_{1H} = \omega(H) r_i = 2090 \cdot 0,029 = 60,61 \text{ м / с};$$

$$z = 0; u_{i0} = \omega_1(0) r_{i5} = 9501 \cdot 0,0129 = 122,6 \text{ м / с}.$$

$$\text{Середня швидкість: } u_{\text{ср}} = \frac{60,61 + 122,57}{2} = 91,54 \text{ м / с}.$$

Осьові швидкості.

Внутрішній шар.

$$z = 0; v_{iv1} = \frac{L_3(1 - K_r)}{\pi r_{*ц}^2} = \frac{0,036 \cdot 0,65}{3,14 \cdot 0,0129^2} = 44,78 \text{ м / с}; \quad (5.143)$$

$$z = H; v_{iH1} = \frac{L_3}{\pi r_{*ц}^2} = \frac{0,036}{3,14 \cdot 0,029^2} = 13,63 \text{ м / с}.$$

Середня осьова

$$\text{швидкість: } v_{\text{ср}} = \frac{44,78 + 13,63}{2} = 29,2 \text{ м / с}.$$

$$\text{Відношення швидкостей: } \frac{u_{\text{ср}}}{v_{\text{ср}}} = \frac{91,54}{29,2} = 3,13.$$

Втрати тиску на вході в циклон:

$$\Delta p_{\text{вх}} = \frac{1,21}{2} \left[\frac{57^2 \cdot 0,05}{0,028} - \frac{91,54 \cdot 0,029}{0,05} + 41,54^2 \right] = 5520,98 \text{ Па}.$$

Втрати тиску на виході з циклону:

$$\Delta p_{\text{вих}} = \frac{1,21 \cdot 29,2^2}{2} [4,6 \cdot 3,13^{1,33} + 3,13^2] = 15403,85 \text{ Па}.$$

Загальні втрати тиску згідно теорії:

$$\Delta p_m = 5520,28 + 15403,85 = 20924,13 \text{ Па}.$$

Експериментальні втрати тиску при коефіцієнті втрат $\xi = 600$:

$$\Delta p_{\text{експ}} = \xi \cdot \rho \frac{w_4^2}{2}; \quad (5.145)$$

$$w_4 = \frac{4L_3}{\pi r_0^2} = \frac{4 \cdot 0,036}{3,14 \cdot 0,12} = 4,6 \text{ м/с};$$

$$\Delta p_{\text{експ}} = 600 \cdot 5,21 \cdot \frac{4,6^2}{2} = 7681,68 \text{ Па}.$$

Коефіцієнт перерахунку:

$$K = \frac{\Delta p_{\text{експ}}}{\Delta p_m} = \frac{7681}{20924} = 0,367.$$

РОЗДІЛ 6 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ ІЗ ЗАКРУЧЕНИМИ ПОТОКАМИ

6.1. Сепараційна спроможність відцентрових пиловловлювачів

Наведені вище залежності розрахунку фракційної ефективності апаратів із закрученими потоками можуть бути використані для встановлення впливу технологічних і геометричних параметрів на їх ефективність. Однак при розборці цих рівнянь часто допускалися ускладнення при інтегруванні через складність явищ, що розглядаються. Тому їх використання для оптимізації параметрів апаратів викликає труднощі. Вона спрощується при використанні поняття критичного розміру частинок, які можуть вловитися в даному апараті.

У цьому розділі поняття критичного діаметру вловлених частинок, названого в подальшому сепараційною спроможністю, використовується для оцінки енергетичної ефективності апаратів різних конструкцій і типорозмірів. Більша частина залежностей взята з припущення, що час, за який частинка досягає стінки апарата, відповідає часу, за який частинка досягає стінки апарата, тобто часу руху газу по спіралі вниз. Таке припущення не зовсім правильне. Не всі частинки, що досягли стінки, бувають уловлені. Крім того, за такою концепцією зростання височини апарата повинно приводити до зменшення критичного діаметру, а це означає, що зростає ефективність очищення, а це не завжди відповідає дійсності.

За іншою концепцією [3, 82] висувається припущення, що для вловлення частинок необхідно перебороти захоплення потоку газу, що рухається в зовнішньому вихорі циклону зверху вниз, а в небезпечній зоні, при повороті – у напрямку осі апарата, тобто

уникнути захоплюючої дії радіального стоку. На основі такої концепції запропонована залежність А.Д. Ліндена [5, 9], який уперше висловив припущення, що частинки пилу, щоб бути вловленими, не обов'язково повинні досягти стінок апарата. Вони можуть бути видалені, якщо в змозі досягти стінок. Частинки можуть бути видалені, якщо їм вдається пройти небезпечну зону під вихідною трубою, цьому він вважає достатнім вирахувати не весь шлях частинки, а тільки переміщення її в небезпечній зоні. Більш загальну теорію про захоплюючу дію радіального стоку запропонував В. Барт [3, 82]. Використовуючи цю концепцію, А.І. Пірумов отримав теоретичні залежності розрахунку $d_{кр}$ [71]. Автор зі співробітниками узагальнив і проаналізував названі залежності. Вони наведені нижче з деякими удосконаленнями .

6.2. Сепараційна спроможність апаратів із зустрічними закрученими потоками циліндричного типу

На частинки в закрученому потоці діють відцентрові сили ($F_{ц}$) та сили опору ($F_{он}$):

$$F_{ц} \geq F_{он} \quad (6.1)$$

Залежно від місця сепараційного об'єму переважати може одна із них або бути в рівновазі. Значення їх можна вирахувати з рівнянь:

$$F_{ц} = \frac{mv_{ц}^2}{r^0} - \text{відцентрова сила, діюча на частинку}$$

пилу.

$$F_{он} = 3\pi d\mu v_r - \text{сила опору частинки.}$$

Останнє рівняння дійсне тільки для ламінарного руху.

Значення вхідних параметрів у формулі (6.1) визначено у п'ятому розділі:

$$v_{42} = \omega_1(z) \frac{r_*^2}{r}, \quad (6.2)$$

$$\omega_1(z) = C_0 \frac{\left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right)}{L_3}, \quad (6.3)$$

$$C_0 = \frac{2M_{ax}}{\rho(L_1 + L_2)r_4^4}, \quad (6.4)$$

$$v_{r2} = \frac{L_2(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)r}, \quad (6.5)$$

$$v_{z2} = -\frac{L_2 z}{\pi H(r_0^2 - r_*^2)}; r_0 > r > r_x, \quad (6.6)$$

$$v_{r1} = -\frac{L_2 r}{2\pi H r_*^2}, \quad (6.7)$$

$$v_{z1} = \frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{\pi r_*^2}; r_* > r > 0, \quad (6.8)$$

$$v_{\varphi 1} = \omega(z)r; r_* > r > 0. \quad (6.9)$$

Зовнішній шар.

Підстановка значень у рівняння v дає наступне:

$$\frac{1}{6} \pi d^3 \rho_m \cdot \frac{C_0^2 \left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right) r_*^4}{r L_3^2 r^2} = 3\pi d \mu \frac{L_2 (r^2 - r_0^2)}{2\pi H (r_0^2 - r_*^2) r}. \quad (6.10)$$

Після нескладного перетворення одержано рівняння розрахунку

$$d_{кр2} \geq \frac{3 \cdot L_3 \cdot r}{C_0 \left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right) r_*^2} \sqrt{\frac{\mu L_2 (r^2 - r_0^2)}{\rho_m \pi H (r_0^2 - r_*^2)}}. \quad (6.11)$$

Внутрішній шар.

Рівняння сепараційної спроможності отримаємо за аналогією з (6.10).

Постановка параметрів для внутрішнього шару в (6.11) дасть наступне рівняння:

$$d_{kp1} = \frac{3L_3}{C_0 \left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right)} \sqrt{\frac{\mu L_2}{\rho_m \pi H r_*^2}}. \quad (6.12)$$

Для циліндричного циклону $L_1 = 0$ можна отримати:

$$d_{kp} \geq \frac{3Hr}{C_0 z r_*^2} \sqrt{\frac{\mu L_2 (r_0^2 - r^2)}{\rho_m \pi H (r_0 - r_*^2)}}. \quad (6.13)$$

6.3. Сепараційна спроможність АЗЗП кінцевого типу

Рівняння рівноваги відцентрової сили та сили опору аналогічне (6.1).

Показники основних параметрів наводимо в роботі, де структура потоку отримана на основі сферичної системи координат. Вони дають простіші рівняння сепараційної спроможності. Під час виведення параметрів було взято коефіцієнт змішування $K=0$, тобто передбачено рівномірний закон змішування внутрішнього і зовнішнього потоків.

Зовнішній шар.

Тангенційна швидкість:

$$v_{\varphi 2} = \frac{C_0 \rho_3 \psi_2 (R_1 \theta)}{2(L_1 + L_2) R \sin \frac{\theta}{2}}; \quad (6.14)$$

Функція току:

$$\psi_2 = \frac{\cos \theta_x - \cos \theta_0}{\pi \alpha_2} \left[L_2 - \pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2) \right] + \frac{\cos \theta_* - \cos \theta_0}{\pi \alpha_2}, \quad (6.15)$$

де A – константа

$$A = \frac{L_2}{\pi \sin \theta_* (R_{\max}^2 - R_{\min}^2)}. \quad (6.16)$$

Кутова швидкість:

$$v_{\theta 2} = \frac{\cos \theta - \cos \theta_0}{\sin \theta} \frac{2A \sin \theta_x}{\theta_2}. \quad (6.17)$$

Радіальна швидкість:

$$v_{R2} = \frac{L_2 - \pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2)}{\pi \cdot R^2 \cdot \theta_2}. \quad (6.18)$$

Значення параметрів:

$\rho_1 = \pi R_{\min}^2 \theta_3$ і $s_2 = \pi R_{\max}^2 \theta_2$ – поверхня поперечного перерізу,

$$\begin{aligned} Q_3 &= (1 - \cos \theta_x)^2 + \sin^2 \theta_x; \quad Q_2 = 2(\cos \theta_x - \cos \theta_0) \\ \cos \theta_x &= \frac{Q_2 + Q_3 \cdot \cos \theta_0}{Q_2 + Q_3}. \end{aligned} \quad (6.19)$$

Перетворення (6.13) у даному випадку призвело до залежності розрахунку сепараційної спроможності у зовнішньому шарі:

$$\begin{aligned} d_{kp2} \geq & \frac{6(L_1 + L_2)R \sin \frac{\theta_x}{2} \sqrt{\frac{\pi \theta_2 2\mu \cdot R \cdot \sin \theta_x}{\rho (\cos \theta_x - \cos \theta_0)} \times 2\pi A \cos \theta_x +}}{C_0 \pi R_{\max}^2 Q_3 (L_1 + L_2) -} \quad (6.20) \\ & + \frac{L_2 - \pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2)}{R^2 (\cos \theta_x - \cos \theta_0)} \\ & - \frac{\pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2)}{\pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2)}. \end{aligned}$$

Внутрішній шар.

Параметри внутрішнього потоку.

$$v_{\varphi 1} = \frac{C_0 \rho_3 \psi_2 (R_1 \theta)}{2(L_1 + L_2)R \sin \frac{\theta}{2}}, \quad (6.21)$$

$$\psi_1 = \frac{1 - \cos \theta}{\pi \theta_3} \left\{ (L_1 + L_2) - \pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2) \right\}, \quad (6.22)$$

$$v_{\theta 1} = \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta} \frac{2A \sin \theta_x}{\theta_3}, \quad (6.23)$$

$$v_{R1} = \frac{(L_1 + L_2) - \pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2)}{\pi R^2 \theta_3}, \quad (6.24)$$

$$v_r = v_0 \cdot \cos \theta + v_r \sin \theta. \quad (6.25)$$

Підстановка в рівняння (6.1) призвела до залежності сепараційної спроможності у внутрішньому шарі:

$$d_{kp1} \geq \frac{6(L_1 + L_2) R \sin \frac{\theta_x}{2} \sqrt{\frac{2\mu A \cdot R \cdot \sin \theta_x \cos \theta_x (1 - \cos \theta_x)}{\theta_3 \rho}} + C_0 R_{\max}^2 \theta_3 (1 - \cos \theta_x) [(L_1 + L_2)] -}{+ \sqrt{[(L_1 + L_2) - \pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2)] \mu R \sin^2 \theta_x} - \pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2) \pi R^2 \theta_3 \rho} \quad (6.26)$$

6.4. Сепараційна спроможність конічних циклонів

На відміну від АЗЗП, у конічному циклоні $L_1 = 0$. Рівняння сепараційної спроможності має вигляд:

$$d_{kpc} \geq \frac{6L_2 R \sin \frac{\theta_x}{2} \sqrt{\frac{2\mu R \sin \theta_x \pi a_2}{\rho (\cos \theta_x - \cos \theta_0)} \cdot 2\pi A \cos \theta_x + \frac{L_2 - \pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2)}{R^2 (\cos \theta_x - \cos \theta_0)} \sin \theta_x}}{C_0 \pi R_{\max}^2 a_3 [L_2 - \pi A \sin \theta_x (R_{\max}^2 - R^2)]}. \quad (6.27)$$

6.5. Сепараційна спроможність циклонів без бункера

У циклонах без бункера, особливо в апаратах циліндричного типу, у нижній частині апарата утворюються несприятливі умови викиду пилу через живильник. Більша частина пилу в небезпечній зоні може

перетекти в осьовий потік. Височина небезпечної зони приблизно дорівнює висоті вхідного патрубку $h_{неб} = h_b$. Сепараційна спроможність у небезпечній зоні знижується. Звичайно, припускається, що витрата вхідного потоку L_2 розділяється на дві складові:

L'_2 – частина потоку, яка входить у внутрішній поступово $L'_2 = (1 - K_\varepsilon)L_2$;

$L'_1 = L_2 K_\varepsilon$ – доходить до нижньої частини конуса без змішування з первинним і складає основу внутрішнього потоку;

$K_\eta = 0,35$ – коефіцієнт розділення потоків.

У цьому випадку сепараційна спроможність циклонів складатиме:

$$d_{kp} \geq \frac{12(L'_1 + L'_2) \sqrt{\frac{L'_2 \mu}{\pi \rho H}}}{C_0 r_* L'_1}. \quad (6.28)$$

6.6. Енергетичні показники відцентрових пиловловлювачів

На першому етапі вибору конструкції, звичайно, використовують залежність опору від показника сепарації. В якості показника сепарації будемо використовувати сепараційну спроможність (СС). Для порівняння всіх можливих варіантів пиловловлювачів побудовані графічні залежності величин втрат енергії (А), необхідної для забезпечення заданої сепараційної спроможності (СС– d_{kp}). СС визначають за залежностями розділу 5.1. Витрати тиску розраховувались за усереднюючими залежностями $\Delta p = E_n \rho V_0^2$ з перерахунком у $\Delta P = E_n \rho V_0^2$, де V_0 – середня швидкість у корпусі апарата.

Енергетичні втрати тиску розраховувалися по залежності [17]:

$$A = \frac{\Delta P}{3600}, \quad (6.29)$$

$$E_n = a \operatorname{Re}^{0,88} \cdot \left(\frac{f_{вх}}{f_{вих}} \right)^{0,78}, \quad (6.30)$$

$f_{вх}, f_{вих}$ – вхідна і вихідна швидкості в патрубках;
 a – емпіричний коефіцієнт, що дорівнює показнику значень.

Енергетичні втрати по розрахунковим даним циклону циліндричного – $2,94 \cdot 10^{-2}$ кВт/1000м³; АЗЗП – $1,055 \cdot 10^{-2}$ кВт/1000м³; конічного циклону – $7,5 \cdot 10^{-2}$ кВт/1000м³; конічного АЗЗП – $14,5 \cdot 10^{-2}$ кВт/1000м³.

На рис. 6.1 наведено показники, розраховані для апаратів $D = 200 \text{ мм}$ при густині пилу $\rho = 2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Представлені дані свідчать про важливість використання циліндричних циклонів під час уловлення частинок, більших за 16 мкм. Частинки розміром 5-10 мкм раціональніше ловити конічними циклонами. Циліндричні АЗЗП мають підвищену продуктивність і менші втрати на очищення у порівнянні з циліндричними циклонами [86]. Конічні АЗЗП не мають помітних переваг порівняно з циклонами конічного типу.

Розшивання небезпечної зони в нижній частині апаратів може суттєво підвищити ефективність уловлювання циліндричних циклонів. Однак наявність бункера ще не є гарантією такого процесу. Для конічних циклонів та АЗЗП використання бункера не обов'язкове.

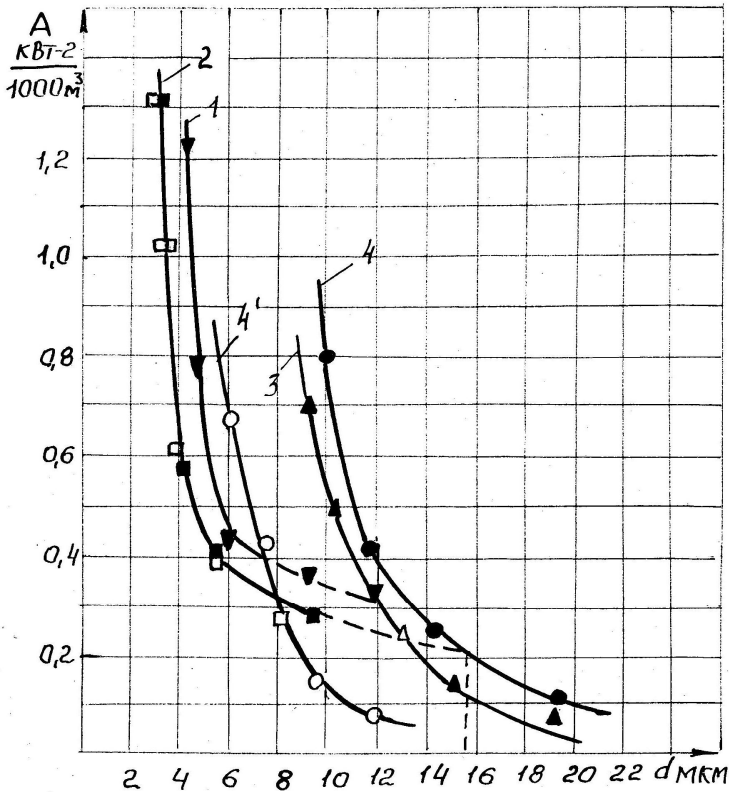


Рис. 6.1. Затрати на уловлення пилу в апаратах з різними конструкціями:

- 1 – циліндричний АЗЗП; 2 – циліндричний циклон без бункера; 3 – циліндричний циклон із бункером; 4 – конічний АЗЗП; 4' – конічний циклон

Підвищення діаметра апарата зміщує граничний розмір розділення при використанні конічних і циліндричних циклонів у напрямку росту діаметра частинок.

Висновок про вибір конструкції апаратів можна зробити на основі звичайних економічних розрахунків з урахуванням річного виробництва пиловидного матеріалу

при сушінні [87, 88], розділенні газових та рідинних неоднорідних сумішей, гранулюванні продуктів та тонкодисперсних матеріалів, процесів високотемпературної обробки полідисперсних систем та вартості даних за всіма видами затрат.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ушаков С.Г., Зверев Н.И. Инерционная сепарация пыли / С.Г. Ушаков, Н.И. Зверев. – М.: Энергия, 1974.–168с.
2. Ужов В. Н. Подготовка промышленных газов к очистке / В. Н. Ужов, В. Н. Вальдберг. – М.: «Химия», 1985. – 216 с.
3. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха / А. И. Пирумов. - М.: «Стройиздат», 1981. – 296 с.
4. Стокман Е.А. Очистка воздуха от пыли на предприятиях пищевой промышленности/ Е.А. Стокман. – М.: Пищевая промышленность, 1977. –304с.
5. Аукс Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Аукс. - М.: Изд. АН СССР, 1955. –349 с.
6. Малезик И. В. Процеси та апарати харчових виробництв / И. В. Малезик. - К.: НУХТ, 2003. – 400 с.
7. Коузов П. А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности / П. А. Коузов, А. Д. Мальгин, Г. М. Скрябин. - Л.: «Химия», 1982. – 255 с.
8. Годес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем / О. М. Годес. - Л.: «Химия», 1981. – 296 с.
9. Страус С. В. Промышленная очистка газов / С. В. Страус. – М.: «Химия», 1981. – 616 с.
10. Русанов А. А. Инпактеры для определения дисперсности промышленных полей / А. А. Русанов, С. С. Янковский. - М.: «ЦНИИТ»нефтехим», 1970. –380 с.
11. Романков П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. - Л.: «Химия», 1982 - 288 с.
12. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. - М.: «Химия», 1971. - 784 с.
13. Смолдховский М. Коагуляция пылеуловителей / М. Смолдховский. – М.: «Онти», 1936. – 739 с.

14. Lfngmuir I. OS RD Report № 865, 1942. – 215 р.
15. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М.: «Физмаггиз», 1959. – 700 с.
16. Медников Е. П. Вихревые пылеуловители / Е. П. Медников. – М.: «Цинтихимпертемалы, серия ХМ-14», 1975. – 43 с.
17. Якуба О. Р. Гідродинаміка та ефективність пиловловлювачів з закрученими потоками в процесах хімічної технології барвників, пігментів та допоміжних речовин. Автореферат дис. докт.техн.наук / О. Р. Якуба - К.: - НТУУ КПІ, 1996. – 38 с.
18. Биргер М. И. Справочник по пыле- и газоулавливанию / М. И. Биргер и др. - М.: «Энергоатомиздат», 1983. – 312 с.
19. Алиев Г. М. Техника пылеулавливания и очистки газов / Г. М. Алиев. - Справочник. - М.: «Металлургия», 1986. – 544 с.
20. Мазус М. Г. Фильтры для улавливания промышленных пылей / М. Г. Мазус, А. Д. Мальгин, М. Л. Магзулис. - М.: «Машиностроение», 1985. – 240 с.
21. Гордон Г. М. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии / Г. М. Гордон, И. Л. Пейсахов. - М.: «Металлургия», 1977. –350 с.
22. Коверя В. М. Промышленная и санитарная очистка газов / В. М. Коверя, Г. А. Фоксин, Н. А. Сидоренко и др. 1978, № 3. – С. 16,17.
23. Башкардин В. Я. Огнеупоры. Источник 1982, № 10. – С. 38-42.
24. Squires A. M., Pfeffer R. I. Air Rollux. Contr. Assoc. 1970, V. 20 № 8. – pp. 534-538.
25. Schaufler E., Zenneue H. Патент ДРГ № 1092281, 1953.
26. Schaufler E. Патент ФРГ № 120163, 1953.

27. Berichte der Leutsche Kerahische Gesellschaft, 1970, № 4. –270 p.
28. Chemi Procesaing (USA), 1969, 32 № 5. – 77 p.
29. Klein H. CZ chemie Technic, 1972, № 5. – pp. 230-234.
30. Кузнецов И. А. Оборудование для санитарной очистки газов / И. А. Кузнецов, К. И. Шмат, С. И. Кузнецов. Справочник. - К.:«Техника», 1989. – 304 с.
31. Сажин Б. С. Основы техніки сушки / Б. С. Сажин. - М.: «Химия», 1984. – 320 с.
32. Сажин Б. С., Гудим Л. И. Пылеуловители со встречными закрученными потоками / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим. - М.: Ниитэхим, 1982. – 45 с.
33. Пылеуловитель со встречными закрученными потоками. - М.: ВДНХ, 1981. – 3 с.
34. Alt C., Schmidt K. Staub Rehalfung der Luft, 1969, 29, № 7. – С. 263-269.
35. Budinsky K. Staub Rehalfxung der Luft, 1972, 32, №3. – С. 87-91.
36. Янков В., Дичев И. Техническая мысль. 1971, №1. – С. 95-102.
37. Сажин Б.С. и др. ТОХТ, 1972, № 4.
38. Ciliberti D., Lancaster V.A. I.C.H.E., 1976, № 22. – С. 394-398.
39. Сажин Б. С. та ін. Матеріали наукової конференції Московського текстильного інституту / Б. С. Сажин. - М.: МТІ, 1979. –380 с.
40. Klein H.C., Z. Chem.Techn., 1971, № 5. – С. 230-234.
41. Грачов В. Г., Бутылкин Ю. П., Дописов В. И., Ерлин Ю. С. Вихревой пылеуловитель. Авторское свидетельство СССР № 768474, М.Кл.В04с, 1980.
42. Лапшин А. Б. Выхревой пылеуловитель. Авторское свидетельство СССР № 956027, М.Кл.В04с, 1982.

43. Якуба А. Р., Недбайло А. В., Беседа В. И., Шевченко А. И., Галич В. Н., Симиков В. Г. Вихревой пылеуловитель. Авторское свидетельство СССР № 1058628, Кл.В04с, 1983.

44. Сажин Б. С., Попов И. А., Векуа Г. Ю., Лапилинкова В. С., Ванчава З.В. Аппарат для тепловой обработки дисперсных материалов. Авторское свидетельство СССР № 1054646. Кл. F2вв, 1983.

45. Юфа А. Н., Лужанский Д. М., Мухидупнов Д. Н. Вихревой пылеуловитель. Авторское свидетельство СССР № 1143472. Кл.В04с, 1989.

46. Сажин Б. С., Баскина Г. А., Васильева О. М., Яковлев А. Ю. Вихревой пылеуловитель. Авторское свидетельство СССР № 1233948. Кл.В04с, 1986.

47. Сажин Б. С., Белоусов А. С., Коротченко С. И., Яковлев А. Ю. Вихревой пылеуловитель. Авторское свидетельство СССР № 1595570. Кл.В04с, 1990.

48. Евса Л. Н., Вавило В. Ф. Вихровий пиловловлювач. Деклараційний патент України на винахід № 47803. Кл.В04с, 2002.

49. Тимошенко В. І., Книшенко Ю. В., Ляшенко Ю. Г. Вихровий пиловловлювач. Патент на винахід України № 71057. Кл.В04с, 2004.

50. Якуба О. Р., Савченко М. Ю., Калашник О. М. Вихровий пиловловлювач. Патент на корисну модель № 52244. Кл.В04с, 2010.

51. Овсієнко Т. О., Голубцов В. Н. Пиловловлювач. Патент на винахід України № 64432. Кл.В04с, 2004.

52. Корнієнко Я. М., Гатілов К. О., Гевліч К. О. Пиловловлювач. Патент на корисну модель України № 46155. Кл.В04с, 2009.

53. Евса Л. Н., Плигунов В. І. Вихровий пиловловлювач. Деклараційний патент на корисну модель України № 14327. Кл.В04с, 2006.

54. Закиров Д. Г., Андреев В.Л. Пылеуловитель. Патент Российской Федерации № 2035238. Кл.В04с, 1995.
55. Добросильский К. Г., Левшаков А. Н., Полушкип В. И., Урюпин В. С. Вихревой пылеуловитель для очистки горячих газов. Патент Российской Федерации № 2056176. Кл.В04с, 1996.
56. Шибраев Е. В., Шибраев А. Е., Тюран Н. П., Хурин И. А., Ватузов Д. Н., Дежуров С. В. Вихревой пылеуловитель. Патент Российской Федерации № 2183497. Кл.В04с, 2002.
57. Семин А. Г., Калгатин В. Г., Мещеряков А. В. Вихревой пылеуловитель. Патент Российской Федерации № 2091172. Кл.В04с, 1997.
58. Закиров Д. Г., Рыбин А. А., Ванешин А. М. Вихревой пылеуловитель. Патент Российской Федерации № 2056178. Кл.В04с, 1996.
59. Шангин Н. Ф. Пылеуловитель с вихороутворювачем. Патент Российской Федерации № 2109549. Кл.В01 Д 45/12,В04с.5/00, 1998.
60. Сажин Б. С., Лукачевский Б. П., Джунисбеков М. Ш., Будим Л. И., Коротченко С. И. Исследование движения газа в аппаратах со встречными закрученными потоками / Б.С. Сажин, Б.П. Лукачевский и др. // Журнал теоретические основы химической технологии (Россия) тем ХСХ, 1985, № 5. – С. 687-690.
61. Герасимов В. М., Якуба О. Р., Тимчук С. О. Структура потоку апаратів із зустрічними закрученими потоками / В.М. Герасимов, О.Р. Якуба, С.О. Тимчук // Вісник СНАУ, серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», 2002, вип. 9. – С. 135-138.
62. Галіч Р. В., Якуба О. Р., Галіч В. М. Поле швидкостей в апаратах з зустрічними закрученими потоками / Р.В. Галіч, О.Р. Якуба, В.М. Галіч // Вісник СНАУ, серія механізація та автоматизація, 2004, вип. 12. – С. 16-20.

63. Якуба О. Р. Удосконалення апаратів із зустрічними закрученими потоками для пиловловлення / О. Р. Якуба, В. В. Касянчук, М. Ю. Савченко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, 2008, вип. 2(18). – С. 85-89.

64. Гудим Л.И. Разработка, исследование и внедрение в промышленность первичной обработки текстильного сырья высокоэффективных систем очистки воздуха с вихревыми пылеуловителями: дисс. докт. техн. наук / Л.И. Гудим. – Москва, 1992. –380 с.

65. Якуба О. Р. Удосконалення рівнянь для розрахунку структури потоків у циліндричних протитечних апаратах / О. Р Якуба, М. Ю. Савченко, Т. В. Колодка // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, 2005, вип. 11(14). – С. 124-131.

66. Якуба О. Р., Калашніков О. М., Ферісей Л. І., Седих, Хрущ Г. О. Структура потоків у протитечному циліндричному циклоні / О.Р. Якуба, О.М. Калашников та ін. // Вісник СНАУ, серія механізація та автоматизація виробничих процесів, 2000, вип. 5. – С. 184-188.

67. Юхименко Н. П., Якуба А. Р., Тимчук С. А. Оптимальное проектирование конических циклонных пылеуловителей / Н.П. Юхименко, А.Р. Якуба, С.А. Тимчук // Научно-технический журнал «Механіка та машинобудування», 2003, №1, т. 2. – С. 321-325.

68. Сабадаш С. М., Якуба А. Р. Поле скоростей в цилиндро-конических циклонах пылеуловителях / С.М. Сабадаш, А.Р. Якуба // Вісник СумДУ. Серія «Технічні процеси», 2009, № 1. – С. 73-78.

69. Тодунов С. К. Уравнения математической физики / С. К. Тодунов. – М.: Наука, 1929. – 391 с.

70. Yakuba A., Sabadash S., Savchenko M. The investigation and warning ant af drop- and dust catchers far compressor station / A. Yakuba, S. Sabadash, M. Savchenko //

International Conference on Compressors and their system. City University London, UK, 2009. – pp. 421-431.

71. Пирумов А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации / А. И. Пирумов. - М.: ИЗУ, Академия строительства и архитектуры СССР, 1961. – 124 с.

72. Ciliberti D. F., Lancaster B. W. Performance of rotary flow cyclones / D.F. Ciliberti // *Allhe gournal*, vol. 22, № 2, 1926. – С. 314-319.

73. Ciliberti D. F., Lancaster B. W. Fine dust collection in a rotary flow cyclone / D.F. Ciliberti // *Chem. Eng. sci.*, 1971, v. 31, № 8. – pp. 499-506.

74. Савченко-Перерва М. Ю. Удосконалення апаратів із зустрічними закрученими потоками для харчових виробництв / М. Ю. Савченко-Перерва, О. Р. Якуба // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торг. – Харків : ХДУХТ, 2014, вип. 1(19). – С. 142-147.

75. Савченко-Перерва, М.Ю. Підвищення ефективності апаратів із зустрічними закрученими потоками для харчової промисловості / М.Ю. Савченко-Перерва, О.Р. Якуба // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2015, № 3/10 (75). – С.43–48.

76. Якуба О.Р. Розрахунок ефективності пиловловлювачів очищення газів компресорних станцій / О.р. Якуба // Вісник СНАУ, серія механізація та автоматизація виробничих процесів, 2003, вип. 10. – С. 277-282.

77. Якуба О. Р., Галіч Р. В. Калашніков О. М. Уточнення залежностей фракційної ефективності апаратів із зустрічними закрученими потоками. Вісник СНАУ, серія механізація та автоматизація виробничих процесів, 2006, № 9 (15). – С. 32-41.

78. Якуба О. Р., Савченко М. Ю. Рівняння розрахунку фракційної ефективності апаратів із

зустрічними закрученими потоками / О.Р. Якуба, М.Ю. Савченко // Вісник СНАУ, серія механізація та автоматизація виробничих процесів, 2008, вип. 1. – С. 34-38.

79. Якуба О. Р., Тимчук С. О., Галіч Р.В. Розрахунок ефективності пило- та каплеуловлювачів очищення газів компресорних станцій / О.Р. Якуба, С.О. Тимчук, Р.В. Галіч // Вісник СНАУ, серія механізація та автоматизація виробничих процесів, 2003, вип. 10. – С. 277-282.

80. Якуба О. Р., Савченко М. Ю., Колодка Т. В. Моделі розрахунку фракційної ефективності циклонних пиловловлювачів / О.Р. Якуба, М.Ю. Савченко, Т.В. Колодка // Вісник СНАУ, серія механізація та автоматизація, виробничих процесів, 2008, вип. 3. – С. 21-26.

81. Сабадаш С. М., Якуба О. Р. Ефективність конічних циклонів / С.М. Сабадаш, О.Р. Якуба // Збірник наукових праць. Харківський державний університет харчування та торгівлі. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 2009, вип. 2 (10). – С. 269-275.

82. Barth W. Berechnung ant Auslegung/ W.Barth // Von. Zyklon Abscheidern and Grund neuerer Untersuchungen. Brennstoff – Warmeuroft, 1956, bd. 8, № 1. – pp. 1-10.

83. W.Barth. Leineweber. Beurteilung ant Auslegung Von. Zyklon Abscheidern. Staub, Bd. 24,1964, № 2. – pp. 41-84.

84. Якуба А. Р., Кузько С. А., Калашников А. Н., Герасимив В. М. Расчёт гидравлического сопротивления центробежных пылеуловителей со встречными потоками/ А.Р. Якуба, С.А. Кузько, А.Н. Калашников и др. // Вісник СумДУ, 2000, № 15. – С. 8-15.

85. Савченко-Перерва М. Ю. Розрахунок втрат тиску апарата із зустрічними закрученими потоками після вдосконалення для харчової промисловості / М. Ю. Савченко-Перерва, О. Р. Якуба // Праці Таврійського

державного агротехнологічного університету : зб. наук. пр., Мелітополь : ТДАТУ, 2014, вип. 14, т. 1. – С. 160-167.

86. Савченко-Перерва М.Ю. Удосконалення вихрових апаратів для інтенсифікації процесу вловлення пилоподібних продуктів в харчовій промисловості: автореф. кан. ... техн. наук / М.Ю. Савченко-Перерва. – Харків: ХДУХТ, 2015.

87. Сабадаш С.М. Обґрунтування енергоефективного процесу сушіння післяспиртової барди: автореф. кан. ... техн. наук / С.М. Сабадаш. – Харків: ХДУХТ, 2016.

88. Сабадаш С. М. Розробка процесу сушіння післяспиртової барди на інертних тілах і вивід критеріальної залежності / С. М. Сабадаш, О. Р. Якуба, Д. Д. Казаков // Східно-Європейський журнал передових технологій, 2015, № 1. – С. 65-70.

Наукове видання

О.Р. Якуба

Савченко-Перерва М.Ю.

Сабадаш С.М.

**МЕХАНІЧНІ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ
ТА ФІЛЬТРИ В ТЕХНОЛОГІЇ
КОМПЛЕКСНОГО ОЧИЩЕННЯ ХАРЧОВИХ
ПИЛОПОДІБНИХ ПРОДУКТІВ**

Монографія

В авторській редакції