

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. О. ГОНЧАРА**

**ПОСІБНИК ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ
« ТЕХНІКА ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

для здобувачів вищої освіти першого рівня
спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища»
галузь знань 18 «Виробництво та технології»

**Дніпро
2023**

О.В. Золотько, О.Є. Золотько, О.В. Долженкова

**ПОСІБНИК ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ З ДИСЦИПЛІНИ
« ТЕХНІКА ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

для здобувачів вищої освіти першого рівня
спеціальність 183 «Технології захисту навколишнього середовища»
галузь знань 18 «Виробництво та технології»

*Рекомендовано Вченою Радою
фізико-технічного факультету
протокол № 19 від 17.10.2022 р.*

**Дніпро
2023**

УДК 66.074.2:621.928.9

Золотько О.В., Золотько О.Є., Долженкова О.В. Посібник до виконання курсової роботи з дисципліни «Техніка захисту навколишнього середовища»: Д.: Сова, 2023.- 64 с.
76 с.

Описані найбільш розповсюджені конструкції апаратів для очищення від пилу промислових викидів у атмосферу та принцип їх дії. Наведені методики й приклади розрахунку пиловловлювачів. Навчальний посібник призначений для студентів спеціальності „Технології захисту навколишнього середовища” та може бути корисним для студентів фізико-технічного фікультету при виконанні ними розділу з охорони праці випускних робіт.

Навчальне видання
Олена Василівна Золотько
Олександр Євгенович Золотько
Олена Вікторівна Долженкова

Посібник до виконання курсової роботи з дисципліни «Техніка захисту навколишнього середовища»

© Золотько О.В., Золотько О.Є., Долженкова О.В. 2023

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Мета та завдання курсової роботи.....	4
2. Структура та вимоги до виконання курсової роботи.....	6
3. Методичні вказівки до виконання курсової роботи.....	8
3.1. Теоретичні відомості про гази та газові суміші. Розрахунок характеристик стану газів за робочих умов.....	8
3.1.1 Густина газової суміші.....	10
3.1.2 Теплоємність та ентальпія газових сумішей.....	12
3.1.3 В'язкість газової суміші.....	14
3.2. Аналіз складу та фізико – хімічних властивостей дисперсних систем.....	15
3.2.1. Дисперсність.....	16
3.2.2. Хімічний склад та густина пилу.....	18
3.2.3. Інші фізико-хімічні властивості пилу.....	20
3.3. Альтернативні варіанти очистки газопилових викидів, обґрунтування вибору двоступеневої очистки викиду від пилу.....	22
4. Розрахунок основних параметрів роботи пиловловлювачів сухої очистки та їх ефективності.....	24
4.1. Гравітаційні пиловловлювачі	24
4.1.1. Конструктивні схеми та принцип дії	25
4.1.2. Методика розрахунку пилоосаджувальної камери прямокутного перерізу	26
4.1.3. Приклад розрахунку гравітаційний пиловловлювача та ефективності очищення повітря від пилу	28
4.2. Відцентрові пиловловлювачі	29
4.2.1. Конструктивні схеми та принцип дії циклонів	30
4.2.2. Методика розрахунку	37
4.2.3. Практичні рекомендації до вибору циклонів	42
4.2.4 Приклад розрахунку	43
4.3. Конструкції батарейних циклонів та рекомендації щодо їх вибору	45
4.3.1. Методика розрахунку батарейних циклонів	48
4.3.2. Приклад розрахунку	50
4. 4. Фільтраційне очищення газів	54
4.4.1. Конструктивні схеми та принцип дії тканинних (рукавних) фільтрів	55
4.4.2. Методика розрахунку рукавного фільтра	59
4.4.3. Приклад розрахунку	61
5.3. Приклад розрахунку електрофільтра	62

Вступ

Забруднення повітряного басейну промисловими викидами є однією з найбільш актуальних екологічних проблем сьогодення. Для якісного вирішення цієї проблеми необхідно розглядати весь комплекс питань, які вона породжує, це, зокрема, види забруднень атмосфери і їхні властивості, нормування якості повітря й викидів, принципи утворення забруднювачів, зміна складу викидів в атмосфері, фізичні й хімічні процеси газоочищення, конструкція газоочисного устаткування й розробка технологій газоочищення, утилізація вловлених продуктів тощо. При цьому особлива увага приділяється всебічному аналізу й оптимізації діючих газоочисних пристроїв з урахуванням перспектив упровадження нових технологій.

1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Курсова робота з дисципліни «Техніка захисту навколишнього середовища» є важливою складовою фахової підготовки студентів і спрямована на формування вмінь обґрунтовувати ступінь відповідності наявних або прогнозованих екологічних умов завданням збереження та відновлення навколишнього середовища.

Мета курсової роботи полягає в формуванні у майбутніх фахівців (бакалаврів) умінь та компетенцій щодо

аналізу кількісно-якісного складу газопилових сумішей, що надходять до атмосфери з урахуванням їх фізико-хімічних властивостей;

оцінки доцільності впровадження того чи іншого засобу очистки технологічних газів на промисловому підприємстві;

вміння розраховувати газоочисні пристрої та обґрунтовувати комплексні схеми очистки газопилових сумішей з оцінкою їх ефективності та усунених екологічних збитків.

Виконання курсової роботи допоможе студентам розраховувати параметри устаткування і процесів сухого очищення від пилу (у пилоосаджувальних камерах, циклонах, рукавних фільтрах), оцінювати доцільність та ефективність їх застосування, обґрунтовувати комплексні схеми газоочищення та екологічні заходи з охорони повітряного середовища, на основі чинних інструкцій аналізувати динаміку викидів-забруднювачів, керуючись при цьому вимогами проекту нормативів гранично допустимого викиду (ГДВ) промислового підприємства, а також контролювати процес забруднення атмосферного повітря.

Завдання курсової роботи:

1. Проаналізувати склад пилогазового викиду, розрахувати характеристики його стану за робочих умов.

2. Проаналізувати склад та фізико – хімічні властивості запропонованого пилу.

3. Проаналізувати переваги, недоліки, ефективність роботи апаратів сухої очистки, а також можливі альтернативні варіанти очистки газопилових викидів.

4. Обґрунтувати вибір двоступеневої очистки викиду від пилу, запропонувати методи та апарати очистки від газів, які містяться у викиді.

5. Розрахувати основні параметри роботи пилоуловлювачів сухої очистки та їх ефективності, враховуючи фракційний розподіл пилу. Після апарату першої ступені очистки виконати перерахунок фракційного складу пилу та його концентрації.

6. Запропонувати методи і апарати очистки запропонованого викиду від газів, що у ньому містяться.

В результаті виконання курсової роботи студенти повинні набути практичні навички з:

– вибору схем газоочистки залежно від критеріїв вибору пилоуловлюючих пристроїв в технологічних процесах та санітарно-гігієнічних вимог до якості атмосферного повітря на промислових підприємствах;

– аналізу властивостей пилу та представлення його дисперсного складу різними методами;

– розрахунків основних параметрів роботи пилоуловлювачів сухої очистки та їх ефективності, враховуючи фракційний розподіл пилу;

– оцінки зміни фракційного складу та концентрації пилу на кожному етапі процесу очистки;

– складання багатоступеневої схеми очистки технологічних викидів та розрахунку її ефективності.

Методичні рекомендації призначені для закріплення теоретичних знань, набутих студентами в лекційному курсі «Техніка захисту навколишнього середовища», а також для формування практичних навичок щодо очистки газопилових викидів. Методичні рекомендації містять опис структури курсової роботи, що складається з двох практичних розрахункових завдань..

2. СТРУКТУРА ТА ВИМОГИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Курсова робота подається до захисту у вигляді пояснювальної записки, що складається з титульного аркуша, завдання, змісту, вступу, розділів, згідно з пунктами завдання, висновку та списку використаної літератури.

Текст пояснювальної записки набирається на комп'ютері в текстовому редакторі Word Office на листах формату А4 (210x297 мм), через один інтервал, шрифтом Times New Roman 14 кегля (всі поля – 20 мм). Абзацний відступ – 1 см. Обсяг пояснювальної записки має становити 20...30 сторінок. Назви розділів наводяться заголовними буквами, жирно, вирівнювання по центру без переносів. Назви підрозділів – малими буквами, жирно, вирівнювання по центру без переносів. Між назвами розділів (підрозділів) та їх текстом – інтервал. Текст вирівнюється за шириною сторінки.

Курсова робота повинна включати такі складові:

Вступна частина:

- титульний аркуш (Додаток А);
- зміст;
- вступ.

Основна частина (назви розділів відповідно до завдань):

1. Аналіз складу пилогазового викиду, розрахунок характеристик його стану за робочих умов.
2. Аналіз складу та фізико – хімічних властивостей пилу.
3. Альтернативні варіанти очистки газопилових викидів, обґрунтування вибору двоступеневої очистки викиду від пилу.
4. Розрахунок основних параметрів роботи пилоуловлювачів сухої очистки та їх ефективності.
5. Методи і апарати очистки запропонованого викиду від газів.

Висновки.

Перелік літературних джерел.

Додатки

Рекомендований зміст курсової роботи наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Зміст курсової роботи та рекомендований обсяг розділів пояснювальної записки

Назва розділів	Кількість сторінок
Титульний аркуш (додаток А)	1
Зміст	1
Вступ (актуальність теми, мета й завдання роботи)	1-2
Вихідні дані	1
Розділ 1. Аналіз складу пилогазового викиду, розрахунок характеристик його стану за робочих умов	2-3
Розділ 2. Аналіз складу та фізико – хімічних властивостей пилу.	2-3
Розділ 3. Альтернативні варіанти очистки газопилових викидів, обґрунтування вибору двоступеневої очистки викиду від пилу.	3-4
Розділ 4. Розрахунок основних параметрів роботи пилоуловлювачів сухої очистки та їх ефективності	8-10
Розділ 5. Методи і апарати очистки запропонованого викиду від газів.	2-3

Висновки	1
Перелік літературних джерел	1
Додатки	1

Виконання курсової роботи студентами передбачає проведення теоретичних (розрахунково-аналітичних) досліджень щодо обґрунтування технології двоступеневої очистки газопилових викидів та розрахунки основних параметрів апаратів сухого очищення.

Курсова робота виконується паралельно із засвоєнням курсу «Техніка захисту навколишнього середовища». Для виконання курсової роботи студенти отримують індивідуальний варіант роботи.

3. Методичні вказівки до виконання розділів курсової роботи

3.1. Теоретичні відомості про гази та газові суміші. Розрахунок характеристик стану газів за робочих умов.

Стан даної маси газу характеризується трьома величинами: об'ємом газу V , тиском p і температурою t . Ці три величини прийнято називати *термодинамічними параметрами* стану газу. При зміні стану газу, наприклад, при нагріванні або стисненні, відбувається зміна його параметрів. Зміна одного параметра газу супроводжується зміною інших його параметрів.

Об'єм газу при постійній температурі змінюється зворотно пропорційно абсолютному тиску, що діє на газ. Ця залежність виражається законом Бойля – Маріотта:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_1}{p_2} \quad (2)$$

або

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = const.$$

Як видно з рівняння, при незмінній температурі добуток об'єму газу на тиск є величиною постійною. У цій формулі V_1 і V_2 - відповідно початковий і кінцевий об'єми газу, м³; p_1 і p_2 - початковий і кінцевий абсолютні тиски, під якими знаходиться газ, Н/м².

При постійному тиску об'єм цієї маси газу в залежності від температури змінюється згідно із законом Гей-Люссака:

$$V = V_0 \left(1 + \frac{t}{273} \right) = \frac{V_0 T}{273} \quad (3)$$

або

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0},$$

де V – об'єм газу при температурі t , °С, м³;
 V_0 - об'єм газу при температурі $t = 0$ °С, м³;

t – температура газу, °С;

T —абсолютна температура, К, ($T=273 + t$);

T_0 —абсолютна температура при 0°С, що дорівнює 273 К.

Як видно з рівняння (3), для даної маси газу, що знаходиться при постійному тиску, підвищення температури на 1°С призводить до розширення газу на 1/273 частину його початкового об'єму, який взято при $t = 0^\circ\text{C}$.

За законом Шарля для даної маси ідеального газу, що знаходиться при постійному об'ємі, підвищення температури на один градус викликає збільшення тиску газу на 1/273 частину того тиску, з яким газ діяв при 0 °С:

$$p = p_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right), \quad (4)$$

або

$$\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0},$$

де p - тиск при температурі t °С, Н/м²;

p_0 —тиск газу при температурі $t = 0$ °С, Н/м².

Зміна одного з параметрів газу залежно від зміни інших параметрів можна визначити з рівняння об'єднаного закону газового стану

$$\frac{V_1 p_1}{V_2 p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (5)$$

Для одиниці маси добуток об'єму газу на тиск пропорційний абсолютній температурі газу.

Під терміном «ідеальний газ» слід розуміти такий газ, який за будь-яких тисків підпорядковується закону Бойля - Маріотта та за будь-яких температур залишається у газоподібному стані.

Вважають, що *при температурі $t = 0$ °С ($T_0 = 273$ К) і тиску $p_0 = 101325$ Н/м² газ знаходиться за нормальних умов*. Об'єм газу у цих умовах позначають V_0 і до розмірності додають букву «н». Наприклад, $V_0 = 5$ м³ (н) означає, що об'єм газу за нормальних умов дорівнює 5 м³.

Робочі умови – температури та тиск відрізняються від нормальних умов. Об'єм газу у цих умовах позначають V_p .

Зазвичай газ складається з декількох газових компонентів. Відношення маси m_i певного компонента газу до об'єму суміші називають концентрацією даного газу в суміші і позначають через k_i :

$$k_i = \frac{m_i}{V}, \text{ кг/м}^3 \quad (6)$$

Кожен компонент газу чинить на стінки ємності, у якій він знаходиться, тиск пропорційний його концентрації в суміші. Чим більшою є маса даного газу в суміші (кількість молекул), тим більший тиск він спричиняє на стінки ємності. Такий тиск кожного компонента газу у суміші називають

парціальним. Сума парціальних тисків газових компонентів суміші $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ дорівнює за законом Дальтона повному тиску суміші $p_{\text{см}}$:

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n = \sum p_i. \quad (7)$$

У розрахунках іноді потрібно знати величину парціального тиску складових газу в газовій суміші. Парціальний тиск суміші для будь-якої складової газу p_i визначають з рівняння (2):

$$p_i V_{\text{см}} = p_{\text{см}} v_i,$$

звідки

$$p_i = p_{\text{см}} \frac{v_i}{V_{\text{см}}}, \quad (8)$$

де $p_{\text{см}}$ - загальний тиск газової суміші, Н/м²;

v_i - об'єм газового компонента у суміші при тиску, що дорівнює тиску суміші, у частках 1 або %;

$V_{\text{см}}$ - об'єм газової суміші, що приймається рівним 1 чи 100%.

Як видно з рівняння (8), парціальний тиск складових газу дорівнює добутку його об'ємної частки на загальний тиск газової суміші.

3.1.1 Густина газової суміші

Якщо відомий хімічний склад газової суміші, то густину цієї суміші за нормальних умов можна визначити за формулою

$$\rho_{0\text{см}} = \frac{M_{\text{см}}}{22,4}, \quad (24)$$

де $M_{\text{см}}$ – молекулярна маса одного кіломоля суміші, кг;

22,4 – об'єм одного кіломоля ідеального газу за нормальних умов, м³ (н).

Для реальних газів величина молекулярного об'єму близька до 22,4 м³ (н). Її знаходять за додатком 1.

У практичних розрахунках здебільшого нехтують різницею у значеннях молекулярних об'ємів різних газів, вважаючи, що обсяг одного кіломоля будь-якого газу дорівнює 22,4 м³ (н).

Якщо вміст компонентів, що входять до суміші газів, виражено в об'ємних відсотках, то молекулярну масу газової суміші знаходять за формулою

$$M_{\text{см}} = \frac{M_1 a_1}{100} + \frac{M_2 a_2}{100} + \dots + \frac{M_n a_n}{100}, \text{ кг} \quad (25)$$

де M_1, M_2, \dots, M_n – молекулярна маса кіломоля компонентів газу, які входять до складу суміші, кг;

a_1, a_2, \dots, a_n - об'ємні відсотки кожного компонента газу у суміші.

У тому випадку, коли вміст компонентів у газовій суміші виражено у масових частках одиниці, b_1, b_2, \dots, b_n , то молекулярну масу визначають з виразу

$$M_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{b_1}{M_1} + \frac{b_2}{M_2} + \dots + \frac{b_n}{M_n}}, \text{ КГ/КМОЛЬ} \quad (26)$$

Густину газової суміші за нормальних умов знаходять за формулою

$$\rho_{0\text{см}} = \frac{1}{100} \left(\frac{M_1 a_1}{22,4} + \frac{M_2 a_2}{22,4} + \dots + \frac{M_n a_n}{22,4} \right), \text{ КГ/М}^3 \text{ (Н)} \quad (27)$$

або

$$\rho_{0\text{см}} = \frac{1}{100} (\rho_{01} a_1 + \rho_{02} a_2 + \dots + \rho_{0n} a_n), \text{ КГ/М}^3 \text{ (Н)} \quad (28)$$

де $\rho_{01}, \rho_{02}, \dots, \rho_{0n}$ - густини компонентів газу за нормальних умов, значення яких наведені у додатку 1.

Густина суміші газів за нормальних умов буде

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{0\text{см}} \frac{273(p_{\text{бар}} \pm p)}{101325(273+t)}. \quad (29)$$

3.1.2 Теплоємність та ентальпія газових сумішей

Для газів питома теплоємність залежить від того, чи відбувається процес при постійному тиску (c_p) або при постійному об'ємі (c_v). Для ідеальних газів справедливе співвідношення

$$c_p - c_v = R, \quad (34)$$

де R – газова стала, Дж/(кг·°С).

Таким чином, якщо відома величина питомої теплоємності газу при постійному тиску, можна визначити його питому теплоємність при постійному об'ємі. Масова питома теплоємність газу при постійному тиску та постійному об'ємі залежить тільки від температури газу.

При цій температурі газу величина питомої теплоємності залежить від тиску. За одиницю кількості газу приймають зазвичай 1 кг, 1 м³ та 1 моль. Якщо за одиницю кількості газу вибирають 1 кг, то теплоємність називають масовою та позначають c_m . Якщо за одиницю кількості газу приймають 1 м³, то теплоємність називають об'ємною та позначають c_v . При вимірі кількості речовини (газу) у молях теплоємність називають мольною і позначають c_m . Всі

ці три види теплоємності чисельно пов'язані між собою. Знаючи одну з теплоємностей, можна знайти значення двох інших. Так, якщо відома масова теплоємність газу, то об'ємну теплоємність можна розрахувати по формулі

$$c_V = c_m \rho_0, \text{ Дж}/[\text{м}^3 (\text{н}) \cdot ^\circ\text{С}] \quad (35)$$

де ρ_0 – густина газу за нормальних умов, $\text{кг}/\text{м}^3 (\text{н})$.

Розрахунковий зв'язок між мольною, масовою та об'ємною теплоємностями визначають за формулами:

$$c_M = c_V \cdot 22,4, \text{ Дж}/[\text{м}^3 (\text{н}) \cdot ^\circ\text{С}] \quad (36)$$

$$c_M = c_V \cdot m, \text{ Дж}/[\text{моль} \cdot ^\circ\text{С}] \quad (37)$$

де m – маса одного моля газу, кг .

Для нагрівання газу на один градус при різних температурах потрібно підвести до нього різну кількість тепла. Теплоємність, віднесена до будь-якої певної температури, називають істинною теплоємністю. Практичні розрахунки зазвичай здійснюють, застосовуючи не істинну, а середню теплоємність. Під середньою теплоємністю розуміють ту кількість тепла, яка в середньому припадає на один градус зміни температури газу при нагріванні його в інтервалі температур від t_1 до t_2 . Середня теплоємність відрізняється від істинної. Чим менша різниця температур, до якої віднесена середня теплоємність, тим ближче її значення буде до значення істинної теплоємності. Значення істинної теплоємності наведено у додатку 1.

У техніці очищення газу теплові процеси майже завжди відбуваються за постійного тиску.

Кількість тепла, необхідної для нагрівання газової суміші, визначається як сума кількостей тепла, що йдуть на нагрівання складових цієї суміші газів. Виходячи з цього положення, можна визначити теплоємність газової суміші

$$c_{cM} = c_1 a_1 + c_2 a_2 + \dots + c_n a_n, \quad (38)$$

де c_1, c_2, \dots, c_n – питомі теплоємності компонентів суміші;

a_1, a_2, \dots, a_n – вміст компонентів суміші у долях одиниці.

Формулу (38) можна застосовувати для визначення теплоємності газової суміші при постійному тиску та при постійному об'ємі. Залежно від необхідності розрахунку масової або об'ємної теплоємності газової суміші слід підставляти у формулу відповідне значення питомої теплоємності компонентів суміші.

У теплових розрахунках, які пов'язані з водяною парою, часто застосовують величину, яку називають ентальпією (ентальпія — грецьке слово, що означає «впровадження теплоти»). Ентальпію позначають буквою i . Вона є кількістю тепла, яку необхідно підвести до 1 кг газу при постійному

тиску, щоб підвищити його температуру від нуля градусів до заданого значення температури

$$i = c_p t, \text{ Дж/кг.} \quad (40)$$

Кількість тепла, що передається 1 кг газу при постійному тиску, дорівнює різниці ентальпій кінцевого та початкового стану цього газу

$$Q = i_2 - i_1, \text{ Дж/кг.} \quad (41)$$

3.1.3 В'язкість газової суміші

Реальні гази і рідини у процесі їх руху мають загальну властивість — тертя між рухомими шарами. Щоб усвідомити закономірності цього тертя, розглянемо розподіл швидкостей при течії газу або рідини вздовж труби (рисунок 1).

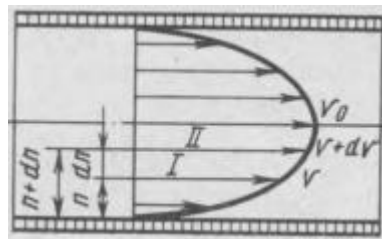


Рисунок 1 – Схема розподілу швидкості руху рідини у трубі

При малих швидкостях руху всі частинки рідини чи газу рухаються паралельно одна одній, тобто їх рух є шаруватим. При цьому частинки, що знаходяться у різних шарах рідини або газу, рухаються з неоднаковою швидкістю. Частинки, розташовані безпосередньо біля стін труби, внаслідок наявності сил зчеплення між ними і стінками труби як би прилипають до останніх, та їх швидкість дорівнює нулю. Частинки наступного шару рухаються, ковзаючи по частинках, прилиплим до стінок. У міру віддалення від стінок труби швидкість частинок зростає і стає максимальною на осі труби. Ковзання одного шару рідини чи газу по іншому супроводжується тертям, яке гальмує частинки, розташовані у сусідніх шарах. Тертя між шарами рідини або газу, що рухаються, називають в'язкістю. Інакше, в'язкістю називають властивість рідини або газу чинити опір відносному руху (зсуву) частинок рідини або газу. Для визначення сили цього тертя розглянемо два рухомі суміжні шари I і II, розташовані дуже близько один від одного на відстані dn . Якщо шар I, що знаходиться від стінки труби на відстані n , буде рухатися зі швидкістю v , то шар II, розташований ближче до центру труби, буде переміщатися зі швидкістю, більшою швидкості шару I на величину dv . Тангенційна напруга внутрішнього тертя між цими шарами або сила тертя відповідно до закону Ньютона пропорційна віднесеної до одиниці довжини

поверхні шарів зміні відносної швидкості руху шарів (градієнту швидкості), її визначають за формулою

$$\tau = \eta \frac{dv}{dn}, \quad (44)$$

де τ – сила внутрішнього тертя, Н/м²;

η - коефіцієнт пропорційності, що називається динамічним коефіцієнтом в'язкості, Н·с/м².

Одиницю вимірювання динамічного коефіцієнта в'язкості називають пуазом (П) на прізвище французького вченого Пуайзеля. 1 П = 0,1 Н·с/м².

Поряд з динамічним коефіцієнтом в'язкості широко використовують кінематичний коефіцієнт в'язкості ν , який дорівнює відношенню динамічного коефіцієнта в'язкості до густини газу або рідини:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \text{ м}^2/\text{с}; \quad (45)$$

де ρ – густина газу чи рідини, кг/м³.

Кінематичний коефіцієнт в'язкості в деяких випадках виражають у стоксах на ім'я англійського вченого Стокса. 1 Ст = 10⁻⁴ м²/с.

Динамічний коефіцієнт в'язкості визначається роботою, яку необхідно здійснити при відносній течії в'язкого газу або рідини для одиниці об'ємної витрати. Кінематичний коефіцієнт в'язкості визначається роботою, яку необхідно здійснити при відносному руху в'язкого газу або рідини для одиниці масової витрати.

У рідині молекули коливаються лише навколо свого середнього становища. Сили в'язкості у цьому випадку обумовлені силами зчеплення між молекулами, які слабшають при нагріванні. Цією властивістю рідини широко користуються в техніці, підігріваячи рідини, коли потрібно зробити їх більш текучими. У газах завжди має місце безладний тепловий рух молекул. Молекули газу переходять з одного шару до іншого. Попадаючи до шару, що рухається з великою швидкістю, молекули, які мають малу швидкість, загальмовують його рух, і, навпаки, проникаючи до шару, що рухається з малою швидкістю, вони прискорюють його рух.

Таким чином, хаотичний рух молекул створює обмін молекулами між шарами газу, що рухаються з різними швидкостями, і веде до вирівнювання їх швидкостей, тобто до виникнення сил внутрішнього тертя, які гальмують рух одного шару відносно іншого. Чим більшою є температура газу, то більшими є сили тертя між шарами газу.

При підвищенні температури в'язкість зменшується для рідин та збільшується для газу.

Динамічний коефіцієнт в'язкості газів і рідин залежить тільки від температури і не залежить від тиску. Кінематичний коефіцієнт в'язкості

залежить і від температури й від тиску. Залежність динамічного коефіцієнта в'язкості газу від температури виражають формулою Сезерленда

$$\eta_t = \eta_0 \frac{273+C}{T+C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}, \quad (46)$$

де η_t - динамічний коефіцієнт в'язкості газу за температури t °С, Н·с/м²;
 η_0 - динамічний коефіцієнт в'язкості газу при температурі $t = 0$ °С, Н·с/м², значення якого знаходять за додатком 1;
 T -абсолютна температура газу, К ($T = 273 + t$);
 C - постійна Сезерленда, значення якої для даного газу наведено у додатку 1.

Кінематичний коефіцієнт в'язкості залежно від температури і тиску визначають за формулою

$$\nu = \frac{\eta_t}{\rho} = \frac{\eta_0}{\rho} RT \frac{273+C}{T+C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (47)$$

Динамічна в'язкість газової суміші може бути обчислена з наступного співвідношення:

$$\frac{M_{\text{см}}}{\eta_{\text{см}}} = \frac{a_1 M_1}{\eta_1} + \frac{a_2 M_2}{\eta_2} + \dots + \frac{a_n M_n}{\eta_n}, \quad (48)$$

де $M_{\text{см}}, M_1, M_2, \dots, M_n$ - відносні молекулярні маси відповідно суміші газу та окремих його компонентів, кг/кмоль;

a_1, a_2, \dots, a_n - вміст у суміші газу компонентів в об'ємних частках одиниці;

$\eta_{\text{см}}, \eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$ - динамічні коефіцієнти в'язкості відповідно суміші газу та окремих його компонентів.

У деяких випадках коефіцієнт в'язкості позначають буквою μ .

У цьому випадку

$$\mu = \eta g, \text{ Н}/(\text{м}\cdot\text{с}); \quad (49)$$

де g – прискорення сили тяжіння, м/с².

3.2. Аналіз складу та фізико – хімічних властивостей дисперсних систем

Пил, що міститься в аерозолях, характеризується такими властивостями: дисперсністю, формою частинок, хімічним складом, густиною, абразивністю, електричними властивостями, а також здатністю коагулювати, злипатися, змочуватися, спалахувати, вибухати та ін.

3.2.1. Дисперсність

Розмір частинок пилу є однією з основних характеристик, що визначають вибір типу апарату або системи апаратів для очищення газу. Крупний пил легше дрібного осідає з газового потоку і може бути уловлений в апараті найпростішого типу. Для очищення газу від дрібного пилу часто потрібно не один, а кілька апаратів, встановлених послідовно по ходу газу. Під дисперсністю пилу розуміють сукупність розмірів всіх його частинок. *Частка частинок, розміри яких знаходяться у певному інтервалі значень, прийнятих як нижня і верхня межа, називають фракцією.*

За дисперсним складом пил поділяють на наступні групи: великодисперсний пил розміром більше 10 мкм, який видно неозброєним оком, і дрібнодисперсний пил розміром менше 10 мкм. Возгони мають розміри менше 1 мкм.

Пил може бути класифікований за розмірами та за іншими ознаками. Зокрема, за гігієнічною оцінкою його ділять на фракції розміром менше 2 мкм та від 2 мкм до 10 мкм.

У газі будь-якого технологічного процесу металургійного виробництва в залежності від його фізико-хімічних характеристик міститься пил найрізноманітнішого дисперсного складу.

У газі будь-якого технологічного процесу в залежності від його фізико-хімічних характеристик міститься пил найрізноманітнішого дисперсного складу.

Зважаючи на те, що частинки пилу розміром більше 60 мкм легко осідають з газового потоку в апаратах найпростішого типу, фракційний склад пилу визначають зазвичай для частинок розміром до 60 мкм і виражають за допомогою таблиці.

Приклад дисперсного складу пилу:

Розмір часток (середній), мкм	Вміст, % (за масою)	Розмір часток (середній), мкм	Вміст, % (за масою)
<5(0,2)	6	30-40(36)	10
5-10(7,5)	8	40-60(51)	23
10-20 (14)	22	> 60 (73)	15
20-30(27)	16		

У деяких випадках дисперсний склад пилу представляють не таблицею, а диференціальними та інтегральними кривими. Диференціальні криві показують, яку частку кожна фракція становить у всій масі пилу, а інтегральні - яка частка частинок має розміри, відмінні від розмірів даної фракції.

Криву дисперсності можна побудувати, відкладаючи в лінійному масштабі по осі абсцис розмір частинок пилу, а по осі ординат - частку частинок відповідного розміру. Таку криву називають диференціальною

кривою розподілу частинок за розмірами (рис. 3, а). Якщо всередині деякого інтервалу масова частка частинок постійна, то розподіл дисперсності пилу виразиться ступінчастою лінією, яка називається гістограмою (рис. 3, б).

Розподіл часток за розмірами зазвичай наводять у вигляді інтегральних кривих. У цьому випадку по осі абсцис відкладають розмір частинок d , а по осі ординат - масову частку частинок (%), розмір яких або менший, або більший d . При побудові кривої можна скористатися лінійним масштабом по осях координат (рис. 3, в), або будувати криву в так званій імовірнісно-логарифмічній системі координат (рис. 3, г). У імовірнісно-логарифмічній системі координат нормальний розподіл пилу за розмірами виражається прямою лінією, яка дає можливість проводити інтерполяцію та екстраполяцію розмірів пилу.

Логарифмічно нормальний розподіл прийнято характеризувати двома величинами: середньгеометричним діаметром і дисперсією. В імовірнісно-логарифмічних координатах при представленні дисперсного складу пилу по осі абсцис відкладають логарифми діаметра частинок, а по осі ординат - сумарну масу частинок в інтервалі $d = 0 \div d$ в частках від одиниці або у відсотках.

При представленні логарифмічно нормального розподілу в імовірнісно-логарифмічних координатах, тобто у вигляді прямої, значення середньгеометричного діаметра відповідає точці перетину цієї прямої з віссю абсцис. Дисперсію визначають як різницю абсцис для точок прямої з ординатами 84 % і 50 % (або відповідно 50 % і 16 %). Знаючи параметри середньгеометричного діаметра частинки та дисперсії, на графіку логарифмічно нормального розподілу пилу за розмірами знаходять лінію, що відповідає цим параметрам, яка дозволяє знайти вміст частинок у будь-якому інтервалі діаметрів.

Для зручності на рис. 22, д зображена імовірнісна шкала у збільшеному масштабі. Вісь абсцис до неї може бути побудована за допомогою звичайної логарифмічної лінійки.

Дисперсний склад пилу зазвичай характеризується медіаною розподілу частинок d_{50} і дисперсією, що позначається σ^2 .

Медіаною розподілу, або медіанним діаметром, прийнято називати діаметр частинки, при якому сумарна маса всіх частинок, що мають розмір менше d_{50} , становить 50%.

Дисперсія характеризується кутом нахилу ліній розподілу пилу в імовірнісно-логарифмічних координатах.

Її виражають залежністю

$$\sigma^2 = \lg^2 \frac{d_{84}}{d_{50}} \approx \lg^2 \frac{d_{50}}{d_{16}},$$

де d_{84} , d_{16} - діаметри частинок, для яких сумарна маса всіх частинок, що мають розмір менший d_{84} та d_{16} , складає відповідно 84 % і 16 % від загальної маси пилу.

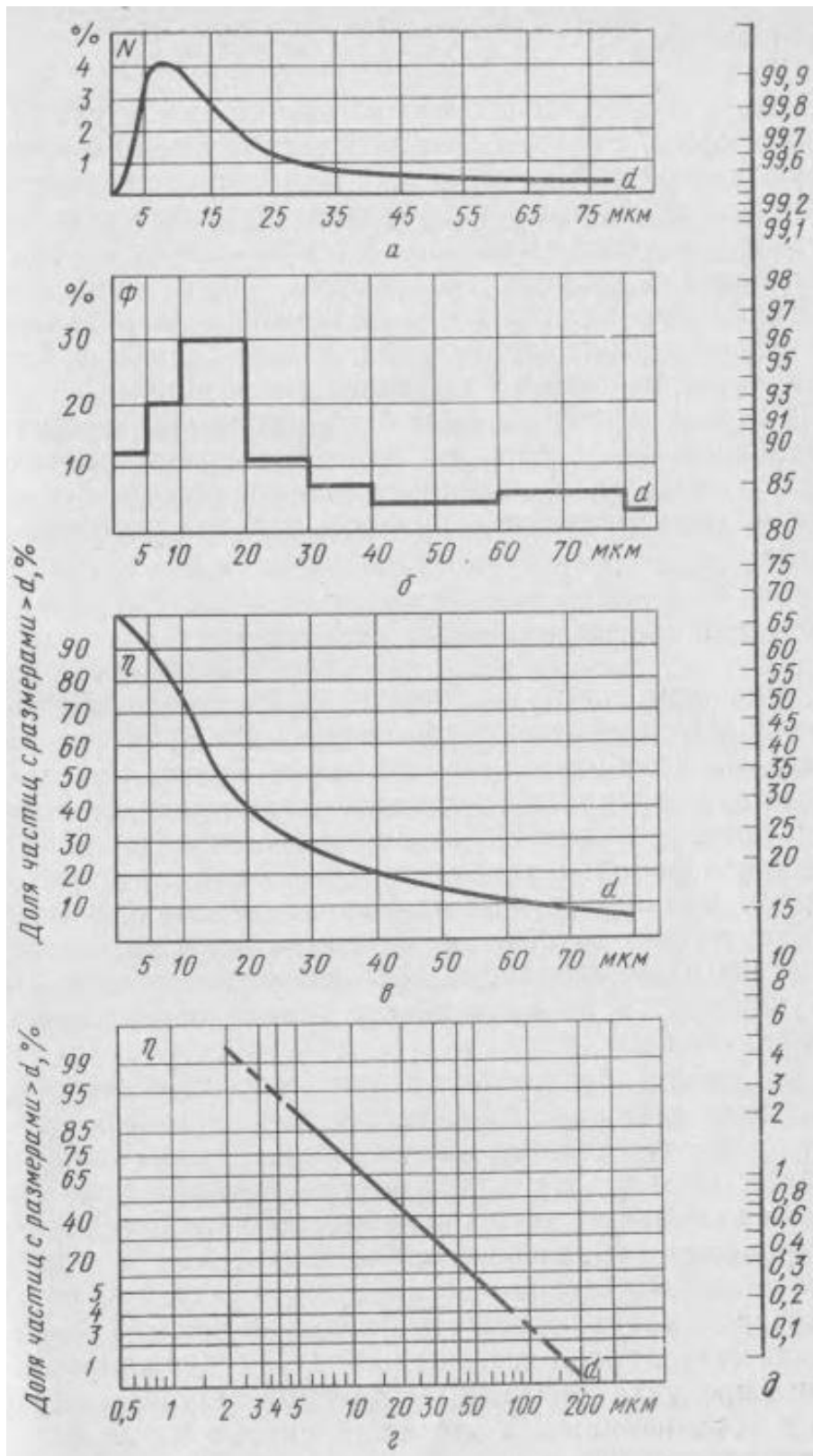


Рис.3 Графічне зображення дисперсного складу пилу:
 а – диференціальна крива розподілення; б- розподілення по фракціям; в –
 інтегральне розподілення у лінійному масштабі координат; з - інтегральне

розподілення в імовірнісно-логарифмічній системі координат; d – імовірнісна шкала

Пил в аерозолях складається з часток найрізноманітнішої форми. Возгони здебільшого мають кулясту або сферичну форму або форму тетраедрів. Частинки, отримані в результаті механічного впливу, являють собою дрібні осколки самої різноманітної неправильної форми. Пил, утворений у процесі спалювання або плавлення матеріалу, поряд з частинками неправильної форми містить велику кількість частинок з оплавленими гранями.

3.2.2. Хімічний склад та густина пилу

Хімічний склад пилу завжди характерний для даного виробництва або технологічного процесу. Наприклад, пил, утворений під час плавки металів, складається з окислів цих металів з домішкою застосовуваних флюсів і добавок; пил, що виділяється в процесі холодної обробки металів абразивним матеріалом, містить дрібні частинки металів та абразивного інструменту; у виробництві будівельних матеріалів пил складається з їх мінеральних складових; текстильний пил утворюється з дрібних частинок волокон, що переробляються, і т. п.

Якщо пил, що утворюється при механічній обробці, за хімічним і речовинним складом майже не відрізняються від вихідного матеріалу, з якого він був утворений, то цього не можна сказати про возгони. При високих температурах технологічного процесу можуть одночасно випаровуватись як метали, так і флюси. У процесі конденсації цього пару утворюються частинки, які можуть містити кілька речовин. Так, у кольоровій металургії возгони поряд із вмістом вихідного продукту насичуються іншими летючими металами і сполуками, зокрема окисом і сульфідом свинцю, сполуками цинку і кадмію, сурми, миш'яку та іншими металами.

Таким чином, возгони відрізняються від вихідного матеріалу і механічного пилу хімічними властивостями.

Розрізняють істинну густина пилу, густина насипної маси пилу та уявну густина пилу. *Істинна густина пилу* обумовлена хімічним складом матеріалу, з якого вона створена, і вимірюється відношенням маси пилу до об'єму, який він займає.

У більшості випадків у процесі очищення газу мають справу з пилом, який після виділення з газу збирається в певній ємності і утворює насипну масу. У цій насипній масі між частинками пилу міститься повітря. Густина насипної маси на відміну від істинної густини враховує наявність повітряних зазорів між окремими частинками пилу та об'єм їх закритих пор і змінюється залежно від способу заповнення (ущільнення) пилу в заданому об'ємі. Величиною насипної густини користуються для визначення об'єму, який займає пил у бункерах. Чим менші розміри частинок пилу, тим менша поверхня їх дотику, тим більша кількість порожнин опиниться між окремими

порошинками в насипній масі і тим меншою буде насипна густина порівняно з істинною. Для великого пилу насипна густина приблизно в 2,5 рази менша від істинної густини, а для пилу дрібного – у 20 разів. Маса пилу, що злежався, в 1,2—1,5 рази більша насипної. Отже, її густина буде більшою за густину насипної маси.

Уявна густина частинки пилу є відношенням маси частинки до об'єму, який вона займає, включаючи наявні в ній закриті пори та порожнечі. Величина об'єму пор і порожнеч залежить від форми та розміру частки. Уявна густина гладкої монолітної частинки збігається з істинною.

Густина пилу відіграє значну роль при очищенні від нього газу. Чим більша густина частинок пилу, тим повніше вони осідають в апаратах, призначених для очищення газу.

Густина деяких видів пилу наведена у додатку 4.

Коагуляція пилу (укрупнення) полягає в здібності його дрібних частинок злипатися між собою та утворювати більші частки. Коагуляція частинок розміром більше 0,1 мкм відбувається внаслідок їх зіштовхування під час руху. Дрібніші частинки пилу коагулюють у процесі броунівського руху під дією молекулярних сил. Дрібний пил, у тому числі й возгони, схильний до мимовільної коагуляції. Частини пилу розміром понад 100 мкм майже не коагулюють у газовому потоці. Пил, утворений в результаті механічних процесів, коагулює менше пилу, що виникає при термічних та хімічних процесах. Чим вище швидкість газу, тим більша його турбулентність, тим більша ймовірність зіткнення частинок пилу, що знаходяться у зваженому стані в газі, і тим швидше вони коагулюють. Частинки пилу різного розміру краще укрупнюються, ніж частинки однакового розміру. Форма зкоагульованого пилу може бути найрізноманітнішою: кулястою, у вигляді ланцюжка і безформною.

Укрупнення крапельок рідини, що знаходяться в газовому потоці, називають *коалесценцією*. Таке укрупнення відбувається при зіткненні крапельок у процесі їхнього руху в газовому потоці.

Злипання пилу - це його здатність налипати на стінки газоходів та апаратів газоочищення, що призводить до часткового або повного забивання їх пилом. Злипання пилу залежить від властивостей його матеріалу, а також від крупності частинок, вологості, температури, наявності включень, які нездатні до злипання і т. п. Наприклад, на холодні поверхні газоходів і апаратів дрібні частки пилу осідають більш інтенсивно, ніж на гарячі. З явищем злипання тісно пов'язана *сипкість* пилу, що оцінюється по куту природного укосу, який займає пил у свіжонасипаному стані. По куту природного укосу пилу визначають крутість стінок течок та бункерів газоочисних апаратів. При зволоженні пилу він втрачає сипкість і набуває властивостей злипання. Залежно від ступеня злипання пил поділяють на чотири групи: такий, що не злипаються, слабо злипається, середньо злипається і сильно злипається.

До пилу, що не злипається, належить глиноземний, сухий шлаковий і коксовий пил. Доменний пил (після сухих пиловловлювачів), коксовий пил,

апатитовий сухий пил, летюча зола з недопалом і при шаровому спалюванні будь-якого вугілля відносяться до слабозлипного пилу. Середньозлипний пил складають пил концентратів кольорової металургії і залізного колчедана, окисли свинцю, олова, цинку, торф'яний пил, летюча зола без недопалу, тирса та ін. До сильнозлипного пилу відносяться зола антрацитогого штибу з недопалом, пил азбесту, бавовни, вовни, цементу, гіпсу, волокнистий пил, пил глини, каоліну, мергелів, алебастру, цементний пил з великим вмістом вологи та інший пил.

Змочуваність пилу називають поверхнєве адсорбування вологи його частинками. Чим менший розмір часток пилу, тим менша їхня здатність змочуватися. Зокрема, возгони погано змочуються водою. Змочуванню перешкоджає газова оболонка, яка утворюється навколо частки пилу. Чим більші частинки пилу і чим округлішою є їх форма, тим слабші сили, що утримують газову оболонку навколо поверхні частинок, і, отже, тим більша їх здатність змочуватися. Змочені частинки краще відокремлюються від газу в апаратах газоочищення.

Займання та вибуховість пилу. Чим менші розміри частинок, чим поруватіша їх структура, тим більша їхня питома поверхня і тим вище їхня фізична та хімічна активність. Висока хімічна активність деяких видів пилу є причиною його взаємодії з киснем повітря. Окислення частинок пилу супроводжується підвищенням температури. Тому у місцях скупчення пилу можливе його самозаймання та вибух. Зважаючи на велику питому поверхню возгонів та наявності у ряді випадків у їх складі неокислених металів, вуглецю і сірки возгони більш схильні до самозаймання. Вибухонебезпечність пилу збільшується із зменшенням його зольності та вологості.

3.2.3. Інші фізико-хімічні властивості пилу

У техніці очищення газів велике значення представляють електричні властивості частинок. Наприклад, питомий електричний опір пилу є одним з головних факторів при проектуванні та експлуатації електрофільтрів. Здатність набувати зарядів також є важливою властивістю пилу. Електричні властивості пилу залежать від його хімічного складу, розміру, форми та інших факторів.

Абразивність (стираюча здатність) пилу суттєво впливає на міцність систем газоочищення при великих швидкостях руху газу. Абразивність частинок пилу залежить не тільки від його твердості, але й від форми та розміру частинок, їх густини та інших факторів.

У техніці газоочищення іноді для зволоження частинок пилу застосовують штучну конденсацію водяної пари з газового потоку. Здатність частинок пилу адсорбувати на поверхні крапельки вологи також є важливою властивістю пилу при газоочищенні. Адсорбційна здатність частинок пилу залежить насамперед від форми частинок; так, на частинках пилу

неправильної форми пара конденсується інтенсивніше, ніж на частинках плоскої форми.

Оптичні властивості пилу (здатність відбивати або поглинати промені світла) мають значення при візуальній оцінці роботи пиловловлюючих установок та при використанні приладів для автоматичного контролю запиленних газів.

Токсичність пилу. Чим дрібніші частки пилу, тим більша їх здатність проникати разом з повітрям в органи дихання людини та викликати різні захворювання. Особливо небезпечні у цьому відношенні тумани. Токсичність пилу залежить і від матеріалу, з якого він утворений (наприклад, свинець, миш'як, ртуть тощо).

3.3. Альтернативні варіанти очистки газопилових викидів, обґрунтування вибору двоступеневої очистки викиду від пилу

Під очищенням газу розуміють відділення від газу або перетворення в нешкідливий стан забруднюючої речовини, яка поступає від промислового джерела.

Способи очищення викидів в атмосферу від шкідливих речовин можна об'єднати в такі групи:

- очищення викидів від пилу та аерозолів шкідливих речовин;
- очищення викидів від газоподібних шкідливих речовин.

Механічні методи застосовують для очищення вентиляційних та інших газових викидів від грубодисперсного пилу. Основними механізмами осадження завислих частинок є дія сил гравітації, інерції, дифузії, а також відцентрових сил та сил зчеплення.

Осадження під дією сил гравітації (седиментація) зумовлено вертикальним осіданням частинок внаслідок дії сили ваги в процесі переміщення їх через газоочисний апарат. Процеси осадження здійснюють у пилоосаджувальних камерах, пилових мішках. Їх використовують як перший ступінь очистки (попередню очистку) для зниження концентрації грубодисперсного пилу перед апаратами тонкого очищення.

Осадження під дією відцентрової сили відбувається в процесі криволінійного руху аеродинамічного потоку, коли виникають відцентрові сили, під дією яких частинки пилу відкидаються на внутрішню поверхню апарату.

Інерційне осадження відбувається у випадку, коли маса частинок або швидкість руху настільки незначні, що вони вже не можуть рухатися разом з газом за лінію течії, що охоплює перешкоду. Намагаючись за інерцією продовжувати свій рух, частинки пилу стикаються з перешкодою і осаджуються на ній.

Дифузійне осадження відбувається внаслідок того, що дрібні частинки пилу зазнають безперервної взаємодії з частинками газів, які знаходяться в

броунівському русі. В результаті цієї взаємодії відбувається осадження частинок на поверхні обтічних тіл або стінок пиловловлювача.

Осадження частинок за рахунок зчеплення спостерігається тоді, коли відстань від частинки, що рухається у газовому потоці, до обтічного тіла, не перевищує її радіус.

В технологічних вентиляційних та енергетичних викидах на підприємствах найбільш часто зустрічаються диоксид сірки, оксиди азоту, оксид та діоксид вуглецю, сірководень, хлор, хлористий водень, пари ртуті, фенолів, синтетичних та лакофарбних матеріалів тощо.

Методи очищення викидів від газоподібних речовин за характером фізико-хімічних процесів з середовищами, які очищуються, поділяються на групи:

- промивання викидів розчинниками, що не вступають в хімічну взаємодію з забруднювачами (метод абсорбції);
- промивання викидів розчинами, які вступають в хімічну взаємодію з забруднювачами (метод хемосорбції);
- поглинання речовин, що містяться у викидах, на поверхнях твердих речовин з ультра тонкою структурою (адсорбція).

Вибір методу очищення залежить від багатьох чинників:

- а) концентрації домішок у відпрацьованих газах;
- б) дисперсного складу;
- б) об'єму газу;
- в) температури газу;
- г) наявності супутніх домішок;
- д) наявності сорбентів;
- е) можливістю рекуперації;
- ж) необхідного ступеня очищення.

Аналіз способів пиловловлювання підтверджує, що процес вилучення твердих (рідких) частинок пилу з повітряного потоку переважно складається з двох етапів.

На першому етапі пилинки усувають з повітряного потоку й переносять до стінок пиловловлювача (сепаратора) у так званий збиральний простір або на збиральні та осаджувальні поверхні. На цьому етапі вилучення пилу застосовуються різні принципи та рушійні сили, а саме гравітаційні, інерційні, перехоплювальні, дифузійні, електростатичні.

Другий етап відокремлення пилових домішок зводиться до подачі його в колектор (збирач) пиловловлювача (сепаратора) різними способами. В сухих механічних пиловловлювачах (сепараторах), де пил знаходиться близько від збиральної поверхні, він переноситься потоком повітря (газу) в колектор, після чого механічним способом усувається за межі пиловловлювача. У мокрих пиловловлювачах – скруберах – пилові домішки, як правило, вносяться в колектор струменем води. В електростатичних осаджувачах і рукавних фільтрах пил спочатку накопичується на збиральні поверхні, а потім через певні інтервали часу усувається з неї (наприклад, струшуванням або

вигріпуванням). Залежно від застосованого на цьому етапі методу існують один або декілька ступенів обробки, які базуються на різних принципах та явищах, таких як рушійні сили масового потоку, інерція, змочуваність, гравітація та вібрація.

На кінцевому етапі процесу сепарації, що включає декілька ступенів обробки, зібраний пил вилучається безперервно або періодично, причому інтервали контролюють вручну або автоматично. При усунуванні пилу з повітряних потоків переважно застосовують комбінації декількох принципів і рушійних сил. Водночас слід відзначити, що на ці процеси впливають допоміжні дії таких явищ, як турбулентність потоку, характеристики пограничного шару, адгезія пилу до стінок пиловловлювача (сепаратора), тому не завжди вдається до початку його використання точно оцінити ефективність роботи. Отже, потрібен ретельний аналіз основних принципів, явищ і рушійних сил, які впливають на ефективність роботи пиловловлювачів.

4. Розрахунок основних параметрів роботи пиловловлювачів сухої очистки та їх ефективності . Гравітаційні пиловловлювачі

Гравітаційні пиловловлювачі – апарати грубого очищення газів. Найчастіше вони використовуються для вловлювання частинок пилу, більших ніж 100 мкм. Пилоосаджувальні камери діють за принципом осадження пилу під дією сили тяжіння при повільному русі пилогазового потоку вздовж неї. Основні конструктивні схеми апаратів наведені на рис. 4.1. Ці апарати виготовляють у вигляді порожнистих камер круглого або прямокутного (рис. 4.1, а) перерізу із бункером знизу для збирання пилу. Перевагами пилоосаджувальних камер слугують простота виготовлення, невеликий гідравлічний опір (50 – 150 Па), відсутність вимог до застосовуваних матеріалів (бетон, цегла, сталь), що надає можливість їх виробляти на неспеціалізованих підприємствах. До недоліків відносять низьку ефективність пиловловлення (40-50%) особливо при очищенні газів від дрібнодисперсного пилу (<20 мкм).

Пилоосаджувальні камери найчастіше використовують як перший ступінь очищення. Ефективність очищення можна підвищити розташуванням усередині камери горизонтальних полиць (рис. 4.1, б), унаслідок чого зменшується висота камери та забезпечується необхідна довжина. Іноді застосовують також вертикальні перетинки, які змінюють напрямок руху газового потоку. У таких апаратах (рис. 4.1, в) поряд з дією сил тяжіння діють й інерційні сили, під впливом яких тверді частинки стикаються з перепонами та випадають із потоку. Широко використовують також радіальний пиловловлювач (рис. 4.1, г), що являє собою розміщений вертикально циліндричний корпус, до якого зверху центральним газоходом надходить газ для очищення. Пил у таких пиловловлювачах відділяється під дією сил

тяжіння та інерції. Газ, виходячи з центрального газоходу, здійснює поворот на 180°. При цьому найбільші частинки пилу під дією сил інерції випадають у пиловий бункер. Видалення пилу у всіх апаратах періодично проводиться спеціальним пристроєм.

Гравітаційні пиловловлювачі найефективніше працюють при швидкостях газу в них 0,6 – 1 м/с. Подальше зниження швидкості газу (до 0,2 м/с) незначною мірою підвищує ступінь уловлення пилу, істотно збільшує габаритні розміри пристроїв. Зростання швидкості руху газу (до 1,5 – 2 м/с) приводить до винесення пилу з апарата.

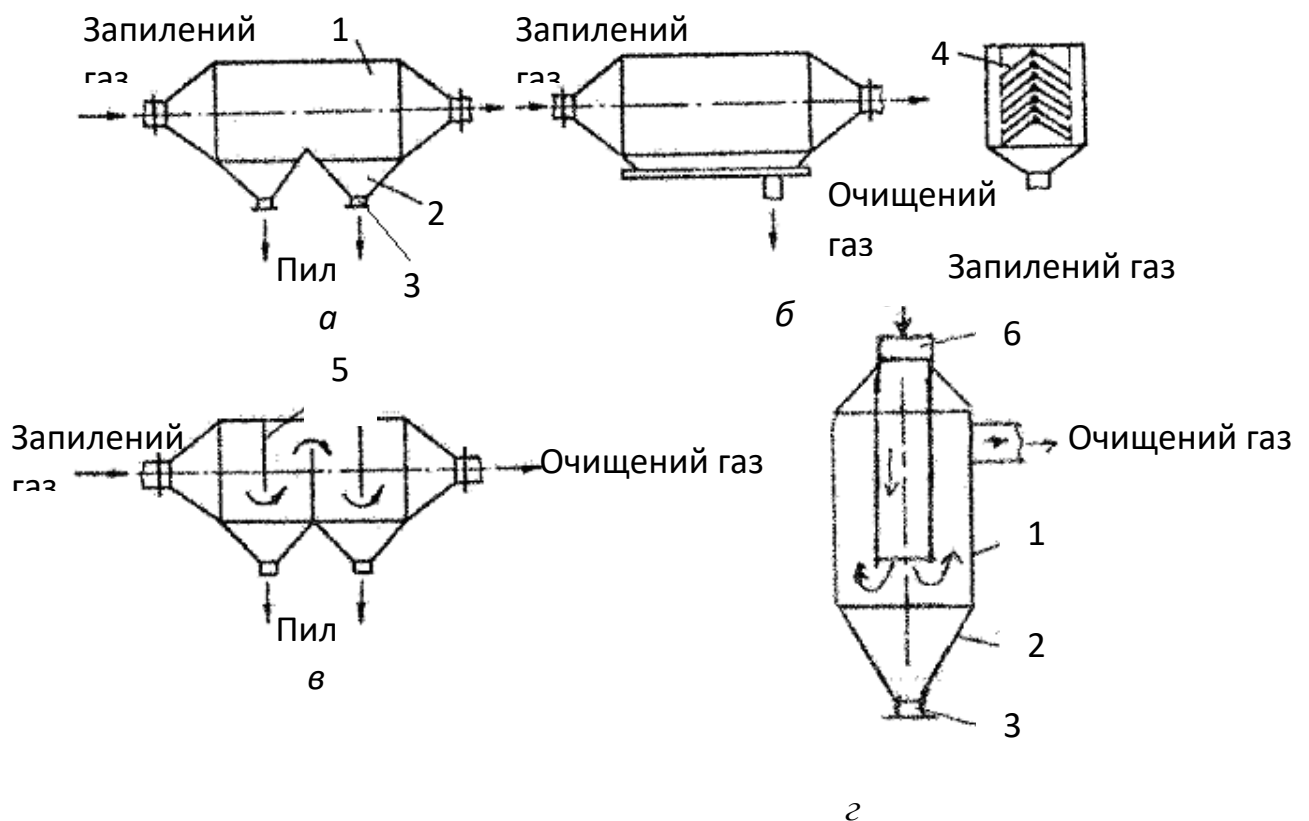


Рис. 4.1. Пилоосаджувальні камери:

- a* – горизонтальна пилоосаджувальна камера; *б* – камера з полицями;
- в* – камера з вертикальними перетинками; *г* – радіальний пиловловлювач;
- 1 – корпус; 2 – бункер; 3 - штуцер для видалення пилу; 4 – горизонтальні полиці; 5 – вертикальні полиці; 6 – патрубок для виведення запиленого повітря

4.2. Методика розрахунку пилоосаджувальної камери прямокутного перерізу

Розрахунок пилової камери зводиться до визначення геометричних параметрів камери, від яких залежить площа осадження пилу. При цьому приймається ряд припущень: пил рівномірно розподіляється по перерізу камери; він складається із сферичних частинок та цілком підлягає закону Стокса; швидкість газу по перерізу камери приймається рівномірною; турбулентність газового потоку відсутня.

Розміри порожнистих пилоосаджувальних камер визначають, виходячи із завданих витрат газів та мінімального седиментаційного діаметра частинок пилу d_s , які разом з більшими частинками повинні випасти з потоку. Доцільно седиментаційний діаметр задавати не більшим 100 мкм, тому що для більших частинок швидкість осадження, отримана експериментально, не збігається зі швидкістю, розрахованою за законом Стокса.

Співвідношення довжини L й висоти H камери знаходять, виходячи зі швидкості газу v_Γ та швидкості осадження частинок діаметром d_s – v_s :

$$\frac{H}{L} = \frac{v_s}{v_\Gamma}. \quad (4.1)$$

Швидкість осадження частинок у межах дії закону Стокса

$$v_{oc} = \frac{d_\tau^2 \rho_\tau g}{18\mu_\Gamma}, \quad (4.2)$$

де d_τ – діаметр частинок пилу, м; ρ_τ – густина матеріалу пилу, кг/м³, g – прискорення вільного падіння, м²/с; μ_Γ – коефіцієнт динамічної в'язкості газу, Па·с.

У розглянутому випадку $v_s = v_{oc}$.

Слід відзначити, що справедливість використання формули (4.2) перевіряють за допомогою критерію Рейнольдса

$$Re = \frac{d_\tau \rho_\Gamma v_\tau}{\mu_\Gamma} < 2, \quad (4.3)$$

де ρ_Γ – густина газу за робочих умов, кг/м³; v_τ – швидкість руху частинки пилу (у даному випадку – осадження).

Значення $Re < 2$ відповідає ламінарному режиму течії газу. При застосуванні закону Стокса мінімальний розмір частинок d_{min} (м), які будуть повністю осаджені в апараті,

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{18\dot{V}_G \mu_G}{(\rho_{\text{ч}} - \rho_G) g B L}}, \quad (4.4)$$

де \dot{V}_G – витрата газу за робочих умов, м³/с.

Ширину камери В (м) визначають, виходячи з прийнятих у розрахунку швидкості газу v_G , висоти камери Н та витрати газу \dot{V}_G :

$$B = \frac{\dot{V}_G}{H \cdot v_G}. \quad (4.5)$$

Об'єм апарата, м³

$$V_{an} = LHB. \quad (4.6)$$

Тривалість проходження газом осаджувальної камери, с

$$\tau = \frac{V_{an}}{\dot{V}_G}. \quad (4.7)$$

За цей же час під дією сили тяжіння частинка пройде шлях

$$h = v_{oc} \cdot \tau. \quad (4.8)$$

Фракційна ефективність пилоосаджувальних камер визначається відношенням:

$$\eta_{\phi} = \frac{h}{H}. \quad (4.9)$$

Загальна ефективність пилових камер

$$\eta = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_{\phi_i} \Phi_i}{100}, \quad (4.10)$$

де Φ_i – вміст фракції в пилу, %.

4.1.3. Приклад розрахунку гравітаційного пиловловлювача та ефективності очищення повітря від пилу

Вихідні дані:

- витрата газу, що надходить на очищення за робочих умов, $\dot{V}_G = 1,5$ м³/с;
- температура газу $t = 110^{\circ}\text{C}$;
- густина газу за нормальних умов $\rho_0 = 1,29$ кг/м³;
- коефіцієнт динамічної в'язкості за нормальних умов $\mu_0 = 17,8 \cdot 10^{-6}$ Па·с;
- швидкість руху газу в камері $v_G = 1$ м/с;
- густина матеріалу частинок пилу $\rho_{\text{ч}} = 1860$ кг/м³;
- дисперсний склад пилу:

d, мкм	10-16	16-25	25-40	40-63	63-100	100-200	200-400
Φ, %	2	5	10	15	20	30	18

Розрахуємо параметри газу за робочих умов:

1) густина газу, кг/м³:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273 \cdot P}{101325 \cdot T}, \quad (4.16)$$

$$\rho = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot 101325}{101325 \cdot 383} = 0,92 \text{ кг/м}^3,$$

де ρ_0 - густина газу за нормальних умов (0⁰С, 101 325 Па); P, T - відповідно робочі тиск та температура;

2) коефіцієнт динамічної в'язкості газу, Па·с:

$$\mu_1 = \mu_0 \frac{273 + C'}{T + C'} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5}, \quad (4.17)$$

$$\mu_1 = 17,8 \cdot 10^{-6} \frac{273 + 124}{383 + 124} \left(\frac{383}{273} \right)^{1,5} = 23,14 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с},$$

де μ_0 – коефіцієнт динамічної в'язкості за нормальних умов, C' – стала Сазерленда.

Будемо вважати, що седиментаційний діаметр частинок пилу, які із більшими крупними частинками повинні повністю вловлюватись у камері, складає 100 мкм, тобто $d_s = 100$ мкм.

Обчислимо швидкість осідання частинок діаметром d_s , користуючись співвідношенням (4.2):

$$v_s = \frac{100^2 \cdot 10^{-12} \cdot 1860 \cdot 9,8}{18 \cdot 23,14 \cdot 10^{-6}} = 0,44 \text{ м/с}$$

Виходячи з цього, габаритні розміри камери вибираємо з відношення (1.1):

$$\frac{H}{L} = \frac{v_s}{v_T} = \frac{0,44}{1} = 0,44, \text{ тобто } L \approx 2,3H.$$

Припустимо $H = 2$ м, тоді $L = 2,3 \cdot 2 \approx 4,6$ м.

Ширина камери [формула (4.5)]:

$$B = \frac{1,5}{2 \cdot 1} = 0,75 \text{ м,}$$

тоді приймемо такі габарити пилоосаджувальної камери: $L = 5 \text{ м}$; $H = 2 \text{ м}$;
 $B = 1 \text{ м}$.

Об'єм апарата [формула (4.6)]:

$$V_{app} = 5 \cdot 2 \cdot 1 = 10 \text{ м}^3.$$

Тривалість проходження газами камери [формула (4.7)]:

$$\tau = \frac{10}{1,5} \approx 7 \text{ с.}$$

Розрахуємо середні швидкості осаджування частинок пилу [формула (4.2)], відстані, які пройдуть під дією сил тяжіння в камері [формула (4.8)], а також значення коефіцієнтів фракційної ефективності [формула (4.9)], дані зведемо в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Параметри процесу вловлення пилу в осаджувачі

$d_{\text{ч}}, \text{ м}$	13	20,5	32,5	51,5	81,5
$V_{\text{ос}}, \text{ м/с}$	0,0074	0,0184	0,0462	0,12	0,29
$h, \text{ м}$	0,05	0,12	0,33	0,84	2
$\eta_{\text{ф}}, \%$	2,5	6	16	42	100

Загальна ефективність очищення в камері визначається за формулою (4.10)

$$\eta = \left(\frac{2,5 \cdot 2}{100} + \frac{6 \cdot 5}{100} + \frac{16 \cdot 10}{100} + \frac{42 \cdot 15}{100} + 20 + 30 + 18 \right) \% = 76,25 \%.$$

Перевіримо можливість застосування формули (4.3) щодо найбільшої частинки ($d_{\text{ч}} = 81,5 \text{ мкм}$):

$$Re = \frac{0,29 \cdot 81,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,92}{23 \cdot 10^{-6}} = 0,95.$$

Таким чином, отримане значення критерію Рейнольдса не перевищує 2, що дає можливість застосовувати теоретичну залежність (4.2), отриману для ламінарного режиму течії газу.

4.2. Відцентрові пиловловлювачі

Циклони являють собою найбільш розповсюджений тип механічних пиловловлювачів.

На рис. 4.2 зображено основні конструктивні схеми циклонних пиловловлювачів. Вони відрізняються за засобом підводу газів до апарата, який може бути спіральним (рис. 4.2, *а*), тангенціальним (рис. 4.2, *б*), гвинтоподібним (рис. 4.2, *в*), розетковим (рис. 4.2, *г*). Циклони також можуть бути прямотечійними (рис. 4.2, *д*).

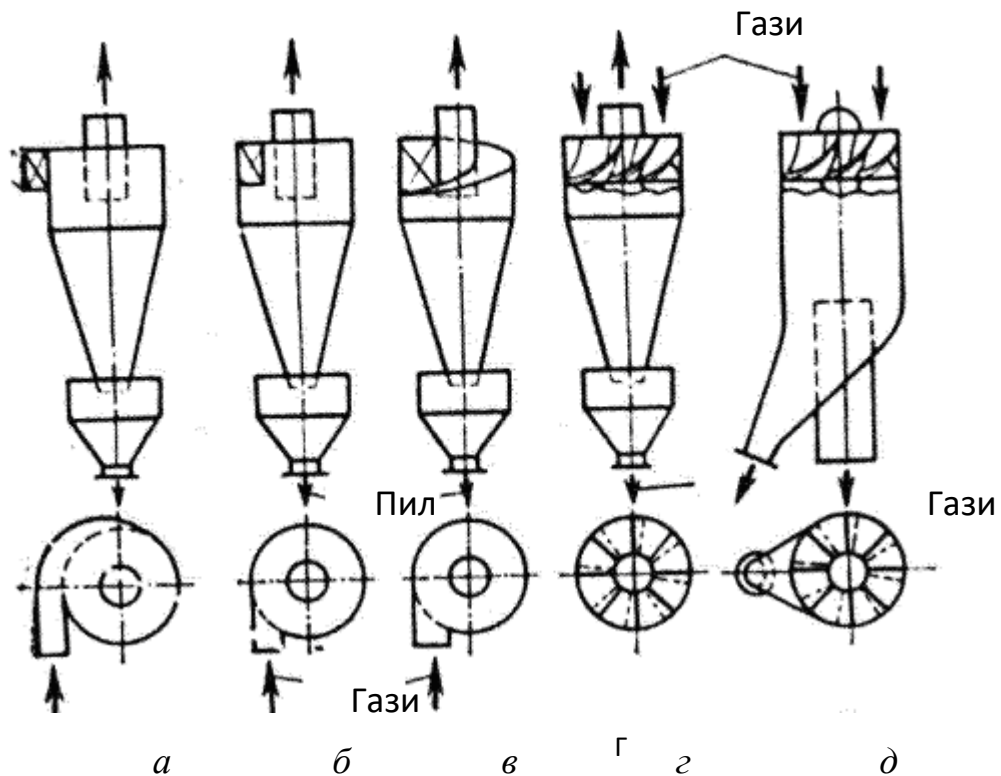


Рис. 4.2. Основні конструкції циклонів за підводом газу:

- а* – спіральний; *б* – тангенціальний; *в* – гвинтоподібний;
- г* – розетковий; *д* – прямотечійний

Принцип дії циклона базується на використанні відцентрових сил, які виникають при обертанні повітряного потоку в корпусі апарата. Схема роботи циклона наведена на рис. 4.2. У результаті дії відцентрових сил частинки пилу, що є в повітряному потоці, відкидаються до внутрішніх поверхонь корпусу 3 та випадають із потоку. Очищений газ продовжує рухатися й робить оберт на 180 градусів і виходить з циклона крізь розміщену вздовж осі вихлопну трубу 2. Звичайно в циклонах відцентрове прискорення в декілька сот разів більше прискорення сил тяжіння, тому навіть дрібнодисперсний пил не може рухатися за лініями течії газів та під впливом відцентрової сили виноситися з кривої руху газів за напрямком до поверхні корпусу.

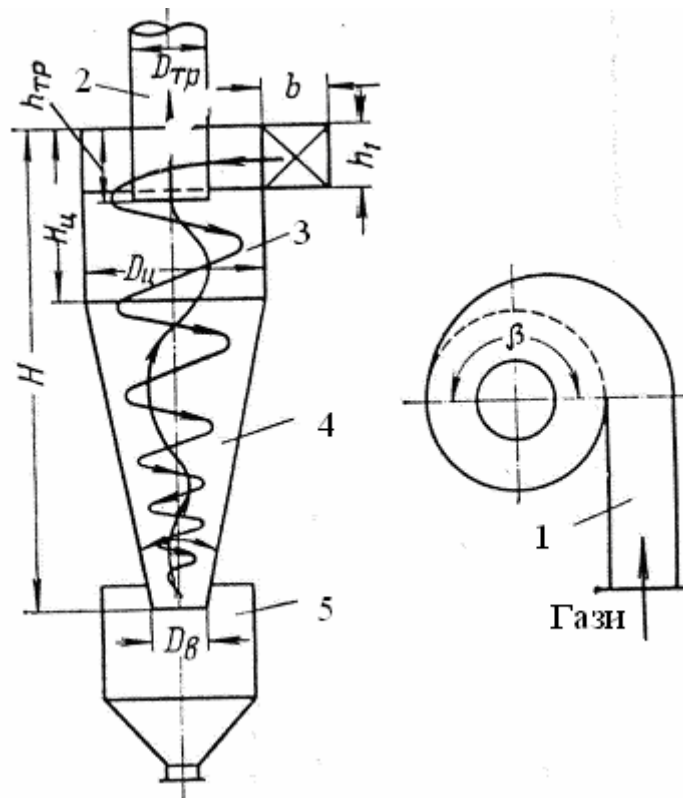


Рис. 4.3. Схема роботи циклона:

- 1 – вхідний патрубок; 2 – вихлопна труба; 3 – корпус циклона;
- 4 – конічна частина циклона; 5 – пиловий бункер

Найбільш поширені типи циклонів конструкції НДІОгазу (циліндричний і конічний), ЦНДІОП (рис.2.3-2.5, табл. 2.1-2.4).

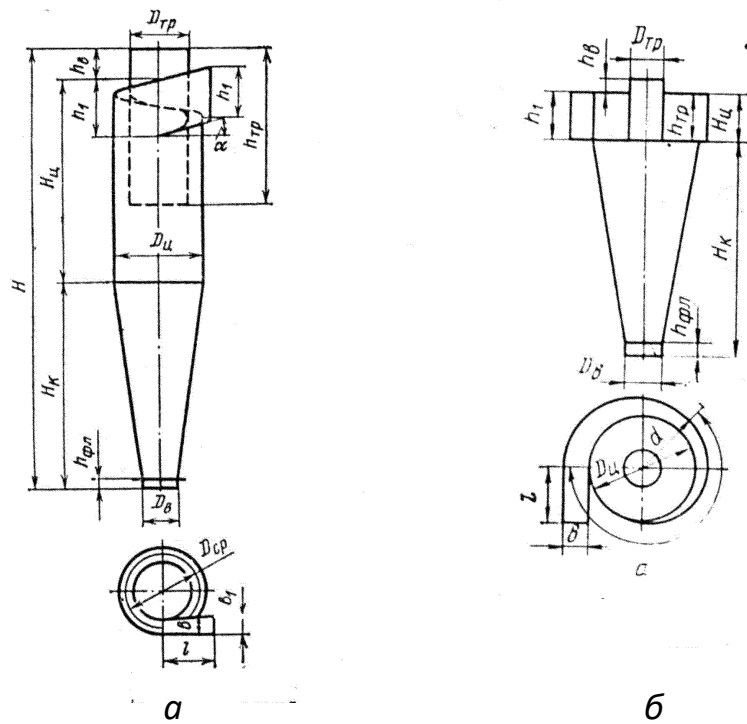


Рис. 4.4. Конструкції циклонів НДЮгазу:

a - циліндричний; *б* – конічний

До циліндричних (рис. 2.3 *a*, табл. 2.1) належать циклони типу ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24. Характерні особливості цих апаратів – наявність подовженої циліндричної частини, кут нахилу вхідного патрубку до горизонталі 11, 15, 24 градусів відповідно та однакове співвідношення діаметра вихлопної труби та діаметра циклона, яке дорівнює 0,59. Звичайно діаметр циліндричних циклонів не перевищує 2 000 мм.

Таблиця 4.1

**Співвідношення розмірів у долях внутрішнього діаметра D
для циклонів ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24**

Найменування	Тип циклона			
	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	ЦН-11
Внутрішній діаметр вихлопної труби d	0,59			
Внутрішній діаметр пиловипускного отвору d_1	0,3-0,4 (більший розмір приймається при малих D та більшій запиленості)			

Найменування	Тип циклона			
	ЦН-15	ЦН-15У	ЦН-24	ЦН-11
Ширина вхідного патрубку в циклоні (внутрішній розмір) b	0,2			
Ширина вхідного патрубку на вході (внутрішній розмір) b_1	0,26			
Довжина вхідного патрубку l	0,6			
Діаметр середньої лінії циклона $D_{ар}$	0,8			
Висота установки фланця $h_{фал}$	0,1			
Кут нахилу кришки й вхідного патрубку циклона α , град	15	15	24	11
Висота вхідного патрубку a	0,66	0,66	1,11	0,48
Висота вихлопної труби h_t	1,74	1,5	2,11	1,56
Висота циліндричної частини циклона H_c	2,26	1,51	2,11	2,06
Висота конуса циклона H_k	2	1,50	1,75	2,0
Висота зовнішньої частини вихлопної труби h_e	0,3	0,3	0,4	0,3
Загальна висота циклона H	4,56	3,31	4,26	4,38

До конічних циклонів (рис. 2.3, б, табл. 2.2) належать циклони типу СК-ЦН-34, СК-ЦН-22, СДК-ЦН-33, СК-УН-34М. Вони характеризуються довгою конічною частиною, спіральним вхідним патрубком та малим співвідношенням діаметра вихлопної труби та діаметра циклона, що дорівнює відповідно 0,34, 0,22, 0,33. Діаметр конічних циклонів практично не перевищує 3 000 мм.

Таблиця 4.2

Співвідношення розмірів у долях діаметра D для циклонів СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М

Найменування	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Внутрішній діаметр циліндричної частини D	> 3000 мм		> 4000 мм
Висота циліндричної частини H_c	0,535	0,515	0,4
Висота конічної частини H_k	3,0	2,110	2,6
Внутрішній діаметр вихлопної труби d	0,334	0,340	0,22
Внутрішній діаметр пиловипускного отвору d_1	0,334	0,229	0,18

Найменування	Тип циклона		
	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
Ширина вхідного патрубку b	0,264	0,214	0,18
Висота зовнішньої частини вихлопної труби h_e	0,2-0,3	0,515	0,3
Висота установки фланця $h_{фл}$	0,1	0,1	0,1
Висота вхідного патрубку a	0,535	0,2-0,3	0,4
Довжина вхідного патрубку l	0,6	0,6	0,6
Висота заглиблення вихлопної труби h_T	0,535	0,515	0,4
Радіус завитки r	$D/2 + b\varphi/2\pi$	$D/2 + b\varphi/\pi$	

Циклони мають такі експлуатаційні та технологічні характеристики:

- ефективність вловлювання пилу (табл. 2.3) залежно від розміру частинок, що вловлюються (фракційна ефективність);
- гідравлічний опір до 750 – 1 500 Па;
- температура викидів до 500 °С;
- гранична концентрація пилу в газах для слабозлипаючого пилу (табл. 2.4);
- швидкість руху повітря, що надходить на очищення, від 2,5 – 3 м/с до 14 – 16 м/с.

Таблиця 4.3

Ефективність вловлювання пилу

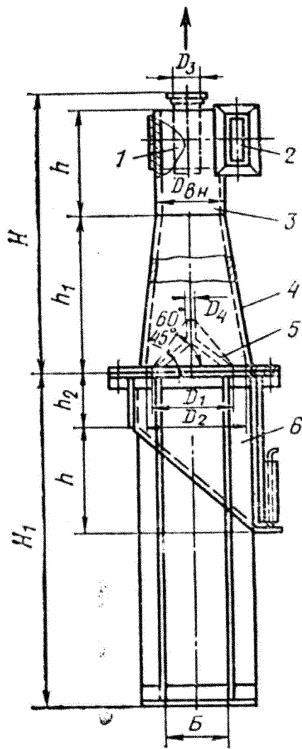
Тип циклона	Ефективність вловлювання залежно від діаметра пилу, %					
	2	5	10	20	50	100
СК-ЦН-34	70	92	98	99,8	99,9	99,9
ЦН-11	-	90	96	99,4	99,9	99,9
ЦН-15	-	60	87	96	99,7	99,9
ЦН-24	-	52	80	92	99,4	99,9

Таблиця 2.4

Гранична концентрація пилу в газах для слабозлипаючого пилу

Діаметр циклона, мкм	800	600	500	400	300	200	100
Гранична концентрація, кг/м ³	2,5	2,0	1,5	1,2	1	0,8	0,6

Граничну концентрацію для середньозлипаючого пилу слід зменшити в 4 рази, для злипаючого пилу – 8-10 разів.



Циклон ЦНДІОП з розширеним конусом [рис. 2.4, табл. 2.5] застосовують для вловлення сухого, неволокнистого, незлипаючогося пилю, а також слабозлипаючогося (сажа, тальк). Характерною особливістю цього циклона слугує засіб транспортування відсепарованого пилю з корпусу в бункер. Пилогазовий потік проходить у бункер крізь кільцеву щілину, що виникає між двома сумісними конусними поверхнями. Знепилений потік повертається в корпус крізь центральний отвір внутрішнього конуса. Особливість прямоточних циклонів - рух газового потоку без зміни напрямку. Перевага таких циклонів – малий гідравлічний опір, спрощений монтаж апаратів, можливість футерування внутрішніх поверхонь стійким до зношення матеріалом. Недолік – низький ступінь пиловловлювання пилю. У зв'язку з цим такі циклони застосовують на першому ступені очищування газів

від пилю.

Рис. 4.5. Схема циклона конструкції НДІОП:

1 – вхідний патрубков; 2 – вихлопна труба; 3 – корпус; 4 – внутрішній конус; 5 – камера пилозбірника 6 – кільцева щілина

Закручування газу в прямоточних циклонах може здійснюватися як за рахунок тангенційного вводу запиленого газу, так і різноманітності конструкцій вхідних патрубків.

Циклони конструкції СІОП мають трикутну форму вхідного та вихідного патрубків (рис. 2.5, табл. 2.6). Вони застосовуються для вловлення сухого неволокнистого пилю, який не злипається.

Параметри циклона конструкції ЦНДЮП

Номер циклона	Продуктивність, тис. м ³ /год	Розміри, мм						Маса установки, кг	
		D	A	B	H	h	A × b	з бункером	з висувним ящиком
1	0,15	50	250	75	1 020	500	26 × 100	17,5	20,6
2	0,31	75	375	112	1 280	750	39 × 150	30,6	35,4
3	0,6	100	500	150	1 540	1 000	52 × 200	45,7	54,2
4	0,92	125	625	188	1 800	1 250	65 × 250	64,8	73,2
5	1,33	150	750	225	2 060	1 500	78 × 300	124,6	97,1
6	2	185	925	278	2 424	1 850	96 × 370	169,4	135,9
7	3	228	1 138	341	2 866	2 275	108 × 455	230,6	191,6
8	4	263	1 313	394	3 230	2 625	136 × 525	438,7	244,8
9	5	293	1 463	439	3 542	2 925	152 × 585	528,5	296,1
10	6	323	1 613	484	3 854	3 225	168 × 645	588,7	351,9
11	7	348	1 738	521	4 114	3 475	181 × 695	654,1	401,6

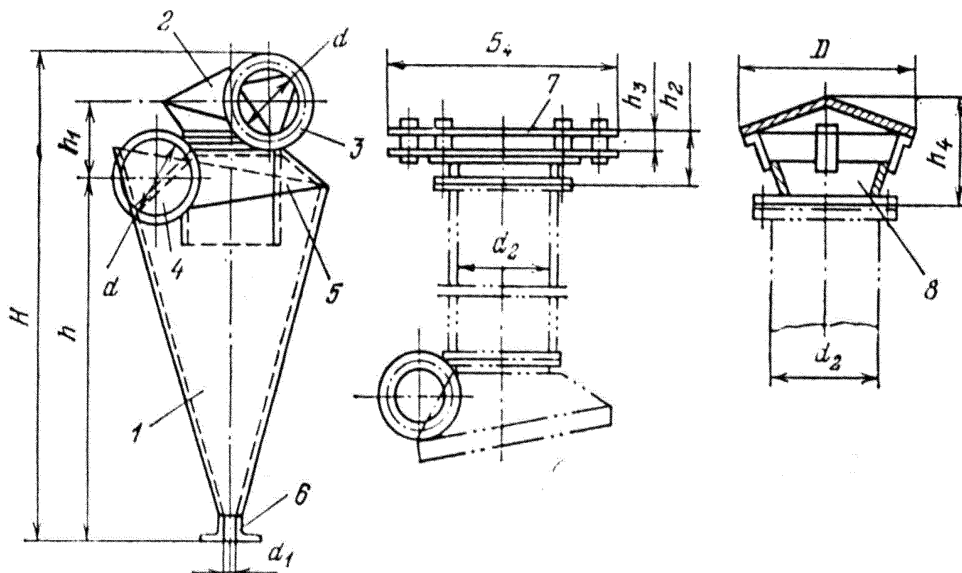


Рис. 4.6. Циклон конструкції СЮП:

1 - корпус; 2,7 - розкручувач; 3,4 - вхідний та вихідний патрубки;
5- кришка корпуса; 6 - пиловідвідний патрубок; 8 – ковпак

Параметри циклона конструкції СЮП

Номер циклона	Продуктивність, м ³ /ГОД	Розміри, мм									Маса, кг
		A ₁	A ₂	A ₃	B	H	h	h ₁	d	d ₁	
1	1,5	703	264	135	675	1 720	1 360	235	170	68	51
2	3	1 045	380	195	970	2 455	1 960	335	245	98	102
3	4,5	1 242	465	240	1 184	2 995	2 400	407	300	120	148
4	6	1 428	535	275	1 363	3 440	2 765	460	345	138	195
5	7,5	1 593	597	310	1 520	3 830	3 075	525	385	154	244
6	8,5	1 698	635	330	1 620	4 808	3 280	555	410	164	275
7	10	1 945	690	335	1 758	4 423	3 555	605	445	178	323

4.2.2. Методика розрахунку циклонів

Задавши тип циклона (табл. 4.7), визначаємо оптимальну швидкість газу в апараті $v_{\text{опт}}$.

Таблиця 2.7

Параметри, що визначають ефективність циклонів ВЦЮгазів

Параметри	ЦН-24	ЦН-15-У	ЦН-15	ЦН-11	СДК- ЦН-34	СК- ЦН-34	СК- ЦН-34М
d_{50}^T , мкм	8.50	6.00	4.50	3.65	2.31	1.95	1.13
$\lg \sigma_{\eta}^T$	0.308	0.283	0.352	0.352	0.364	0.308	0.340
$v_{\text{опт}}$, м/с	4.5	3.5	3.5	3.5	2.0	1.7	2.0

Примітка. Значення d_{50}^T , наведені в таблиці, відповідають таким умовам роботи циклонів: середня швидкість газу в циклоні $v = 3,5$ м/с; діаметр циклона $D = 0,6$ м; щільність частинок $\rho_{\text{ч}} = 1930$ кг/м³; динамічна в'язкість газу

$$\mu_{\text{г}} = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Далі розраховуємо необхідну площину перерізу циклонів, м²

$$F = \frac{Q_p}{V_{\text{опт}}} . \quad (2.1)$$

Діаметр циклона визначаємо, задаючи кількість циклонів

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785N}} . \quad (2.2)$$

Округляємо його до величини найближчого значення ряду, мм: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000, 1 250, 1 400, 1 600, 1 800. У практиці виробництва найчастіше використовують циклони діаметром до 1 000 мм.

Обчислюємо дійсну швидкість газу в циклоні, м/с:

$$v = \frac{Q}{0,785ND^2} . \quad (2.3)$$

Швидкість руху повітря в циклоні не повинна відхилятися більше ніж на $\pm 15\%$ від оптимальної.

Розраховуємо коефіцієнт гідравлічного опору одиночного циклона або групи циклонів:

$$\xi = k_1 \cdot k_2 \cdot \xi_{500}^{c(n)} + k_3, \quad (2.4)$$

де $\xi_{500}^{c(n)}$ – коефіцієнт гідравлічного опору одиночного циклона діаметром 500 мм. Індекс “с” означає, що циклон працює в гідравлічній мережі, а індекс “n” – без мережі, тобто працює прямо на вихлоп в атмосферу; k_1 - поправковий коефіцієнт на діаметр циклона, визначений за табл. 2.7; k_2 - поправковий коефіцієнт на запиленість газу; k_3 - коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, пов’язані з компоновкою циклонів у групу.

Значення коефіцієнтів, що входять у залежність (2.4), наведено в табл. 2.8-2.10.

Таблиця 4.8

Поправковий коефіцієнт k_1 на вплив діаметра циклона

Діаметр циклона, мм	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М
150	0,94	0,85	1,0
200	0,95	0,90	1,0
300	0,96	0,93	1,0
450	0,99	1,0	1,0
500	1,0	1,0	1,0

Таблиця
4.9

Значення поправкових коефіцієнтів k_2 при запиленості газу ($D = 500$ мм)

Тип циклона	Поправковий коефіцієнт при запиленості газу, г/м ³						
	1	10	20	40	80	120	150
1	2	3	4	5	6	7	8
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,5
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87

Закінчення табл. 2.9

1	2	3	4	5	6	7	8
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СКД-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,95	-	-	-

Таблиця 4.10

Коефіцієнт k_3 для врахування додаткових втрат тиску

Характеристика групового циклона	Значення коефіцієнта
Кругове компонування, нижнє організоване підведення	60
Прямокутне компонування, організоване підведення, циклонні елементи розташовані в одній площині	35
Прямокутне компонування, але завитковий відвід від циклонних елементів	28
Прямокутне компонування, вільне підведення потоку в загальну камеру	60

Примітка. Для одиночних циклонів $k_3 = 0$.

Визначаємо втрати тиску в циклоні, Па:

$$\Delta P = \frac{\xi \rho v^2}{2}, \quad (2.5)$$

де ξ – коефіцієнт гідравлічного опору циклона; ρ – густина газу за робочих умов (1.16), кг/м³.

Якщо втрати тиску ΔP виявились прийнятними, переходимо до розрахунку повного коефіцієнта очищення газу в циклоні. При цьому приймається, що коефіцієнт очищення газів в одиночному циклоні й групі циклонів однаковий. У дійсності коефіцієнт очищення газу в групі циклонів може виявитися трохи нижчим, ніж в одиночному циклоні. Це пояснюється можливістю виникнення перетоків газу через бункер, які знижують коефіцієнт очищення газу в групі циклонів.

Загальний і фракційний коефіцієнти очищення газу (ступінь уловлення пилу) залежать від розміру вловлюваних частинок пилу d , умовної швидкості газу в циклоні v , типу та діаметра циклона D , густини частинок пилу $\rho_{\text{ц}}$ і газу $\rho_{\text{Г}}$.

На основі математичної обробки рівняння для ймовірних функцій одержуємо вираз для визначення ступеня вловлення пилу циклоном, %

$$\eta = 100\Phi(x). \quad (2.6)$$

Значення x стосовно циклонів обчислюємо за формулою

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta}^T + \lg^2 \sigma_n}}, \quad (2.7)$$

де d_m – середньомедіанний розмір вловлюваних частинок пилу, мкм (розмір частинки, за якого маса всіх частинок, розміром більших за d_m , дорівнює масі всіх частинок, менших за d_m); d_{50} – розмір частинок, вловлюваних циклоном за фактичних умов роботи на 50 %, мкм; $\lg\sigma^T$ – величина, що характеризує дисперсію частинок пилу, вловлених в умовному циклоні (табл. 2.11, 2.12); $\lg\sigma_n$ – середньоквадратичне відхилення функції розподілу (дисперсії) вловлюваних частинок пилу:

$$\lg \sigma_n = \lg \frac{d_{84,1}}{d_m} = \lg \frac{d_m}{d_{15,9}}. \quad (2.8)$$

Тут $d_{84,1}$ і $d_{15,9}$ – розмір частинок пилу, для яких маса всіх частинок, що мають розмір менший за $d_{84,1}$ і $d_{15,9}$, становить відповідно 84,1 і 15,9 % від загальної маси пилу.

Таблиця

4.11

Параметри, що визначають ефективність циклонів

Параметри	Конструкція циклона		
	СІОП	ВЦНПОТа	Гіпродревпрома (тип Ц)
d_{50}^T , мкм	2,6	8,6	4,12
$\lg\sigma_{\eta}^T$	0,28	0,32	0,34
$v_{\text{опт}}$, м/с	1,00	4,00	3,3
ξ	1 400	75	210

Таблиця 4.12

Значення коефіцієнтів гідравлічного опору циклонів ($D = 500$ мм; $v = 3$ м/с)

Тип циклона	d/D	Без додаткового улаштування		З кільцевим дифузором		З вихідним завитком	З відводом 90° R/d = 1,5	
		$\xi_{ц}^c$	$\xi_{ц}^п$	$\xi_{ц}^c$	$\xi_{ц}^п$		l/d = 0-12 $\xi_{ц}^c$	l/d >12 $\xi_{ц}^c$
ЦН-11	0,59	245	250	207	215	235	245	250
ЦН-15	-	155	163	132	140	150	155	160
ЦН-15У	-	165	170	140	148	158	165	170
ЦН-24	-	75	80	64	70	73	75	80
СДК-ЦН-33	0,33	520	600	-	-	500	-	560
СК-ЦН-34	0,34	1 050	150	-	-	-	-	-
СК-ЦН-34М	0,22	-	2 000	-	-	-	-	-

Примітка. Індекс "с" означає, що циклон працює в гідравлічній мережі, а "п" – без мережі, тобто прямо на вихлоп в атмосферу.

Вибравши із табл. 2.7 або 2.11 два параметри d_{50}^T і $\lg \sigma_{\eta}^T$, які характеризують парціальну ефективність вибраного типу циклона при умовах, указаних у таблиці, визначаємо значення параметра d_{50} при робочих умовах (діаметр циклона, швидкість потоку, щільність пилу, динамічна в'язкість газу) за рівнянням

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{D_T} \cdot \frac{\rho_{чТ}}{\rho_ч} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{v_T}{v}}, \quad (2.8)$$

де d_{50}^T – розмір частинок, вловлюваних умовним циклоном на 50%; D_T , $\rho_{чТ}$, μ_T , v_T – параметри, що відповідають вибраним для умовного циклона.

Числове значення функції $\Phi(x)$ знаходимо залежно від величини x (формула 2.8, табл. 2.13).

Одержані значення ступеня вловлення пилу в циклоні η зіставляємо з потрібним значенням ступеня вловлення пилу, %

$$\eta_T = \frac{C_{вх} - C_{вих}}{C_{вх}} \cdot 100\%, \quad (2.9)$$

де $C_{вх}$, $C_{вих}$ – концентрація пилу в очищуваному та очищеному газі, г/м³.

Якщо η менша за потрібну, обираємо інший тип циклона з більшим значенням коефіцієнта гідравлічного опору. Для орієнтовних розрахунків необхідного значення рекомендується залежність

$$\xi_{y2} = \xi_{y1} \cdot \left(\frac{100 - \eta_p}{100 - \eta} \right)^2 \cdot \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{D_2}{D_1}, \quad (2.10)$$

де індекс “1” належить до розрахункових, а індекс “2” відповідає вимогам до параметрів циклона. Інший шлях – зменшення діаметра циклонів, або збільшення їх кількості.

Таблиця 4.13

Значення нормальної функції розподілу

x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)	x	Φ(x)
1	2	3	4	5	6	7	8
-2,70	0,0035	-1,06	0,1446	0,00	0,5000	1,08	0,8599
-2,60	0,0047	-1,04	0,1492	0,02	0,5080	1,10	0,8643
-2,50	0,0062	-1,02	0,1539	0,04	0,5160	1,12	0,8686
-2,40	0,0082	-1,00	0,1587	0,06	0,5239	1,14	0,8729
-2,30	0,0107	-0,98	0,1635	0,08	0,5310	1,16	0,8770
-2,20	0,0139	-0,96	0,1685	0,10	0,5398	1,18	0,8810
-2,10	0,0179	-0,94	0,1736	0,12	0,5478	1,20	0,8849
-2,00	0,0228	-0,92	0,1788	0,14	0,5557	1,22	0,8888
-1,98	0,0239	-0,90	0,1841	0,16	0,5636	1,24	0,8925
-1,96	0,0250	-0,88	0,1894	0,18	0,5714	1,26	0,8962
-1,94	0,0262	-0,86	0,1949	0,20	0,5793	1,28	0,8997
-1,92	0,0274	-0,84	0,2005	0,22	0,5871	1,30	0,9032

Закінчення табл. 2.13

1	2	3	4	5	6	7	8
-1,90	0,0288	-0,82	0,2061	0,24	0,5948	1,32	0,9066
-1,88	0,0301	-0,80	0,2119	0,26	0,6026	1,34	0,9099
-1,86	0,0314	-0,78	0,2177	0,28	0,6103	1,36	0,9131
-1,84	0,0329	-0,76	0,2236	0,30	0,6179	1,38	0,9162
-1,82	0,0344	-0,74	0,2297	0,32	0,6255	1,40	0,9192
-1,80	0,0359	-0,72	0,2358	0,34	0,6331	1,42	0,9222
-1,78	0,0375	-0,70	0,2420	0,36	0,6406	1,44	0,9251
-1,76	0,0392	-0,68	0,2483	0,38	0,6480	1,46	0,9279
-1,74	0,0409	-0,66	0,2546	0,40	0,6554	1,48	0,9306
-1,72	0,0427	-0,64	0,2611	0,42	0,6628	1,50	0,9332
-1,70	0,0446	-0,62	0,2676	0,44	0,6700	1,52	0,9357
-1,68	0,0465	-0,60	0,2743	0,46	0,6772	1,54	0,9382
-1,66	0,0485	-0,58	0,2810	0,48	0,6844	1,56	0,9406
-1,64	0,0505	-0,56	0,2877	0,50	0,6915	1,58	0,9429
-1,62	0,0526	-0,54	0,2946	0,52	0,6985	1,60	0,9452
-1,60	0,0548	-0,52	0,3015	0,54	0,7054	1,62	0,9474
-1,58	0,0571	-0,50	0,3085	0,56	0,7123	1,64	0,9495
-1,56	0,0594	-0,48	0,3156	0,58	0,7190	1,66	0,9515
-1,54	0,0616	-0,46	0,3228	0,60	0,7257	1,68	0,9535

-1,52	0,0643	-0,44	0,3300	0,62	0,7324	1,70	0,9554
-1,50	0,0668	-0,42	0,3372	0,64	0,7389	1,72	0,9573
-1,48	0,0694	-0,40	0,3446	0,66	0,7454	1,74	0,9591
-1,46	0,0721	-0,38	0,3520	0,68	0,7517	1,76	0,9608
-1,44	0,0749	-0,36	0,3594	0,70	0,7580	1,78	0,9625
-1,42	0,0778	-0,34	0,3669	0,72	0,7642	1,80	0,9641
-1,40	0,0808	-0,32	0,3745	0,74	0,7703	1,82	0,9656
-1,38	0,0838	-0,30	0,3821	0,76	0,7764	1,84	0,9671
-1,36	0,0869	-0,28	0,3897	0,78	0,7823	1,86	0,9686
-1,34	0,0901	-0,26	0,3974	0,80	0,7881	1,88	0,9699
-1,32	0,0934	-0,24	0,4052	0,82	0,7937	1,90	0,9713
-1,28	0,1003	-0,22	0,4129	0,84	0,7995	1,92	0,9726
-1,26	0,1038	-0,20	0,4207	0,86	0,8051	1,94	0,9738
-1,24	0,1075	-0,18	0,4386	0,88	0,8106	1,96	0,9750
-1,22	0,1112	-0,16	0,4364	0,90	0,8159	1,98	0,9761
-1,20	0,1151	-0,14	0,4443	0,92	0,8212	2,00	0,9772
-1,18	0,1190	-0,12	0,4522	0,94	0,8264	2,10	0,9821
-1,16	0,1230	-0,10	0,4602	0,96	0,8315	2,20	0,9861
-1,14	0,1271	-0,08	0,4681	0,98	0,8365	2,30	0,9893
-1,12	0,1314	-0,06	0,4761	1,00	0,8313	2,40	0,9918
-1,10	0,1357	-0,04	0,4840	1,02	0,8461	2,50	0,9938
-1,08	0,1401	-0,02	0,4920	1,04	0,8508	2,60	0,9953

4.2.3. Приклад розрахунку

Розрахувати циклон НДІОгазу для очищення відхідних газів інструментального цеху машинобудівного підприємства за таких вихідних даних:

- витрата очищуваного газу за робочих умов $\dot{V} = 972 \text{ м}^3/\text{год}$;
- густина газу за робочих умов $\rho_{\Gamma} = 1,19 \text{ кг/м}^3$;
- динамічна в'язкість за робочої температури $\mu = 19,57 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- дисперсійний склад пилу $d_m = 38 \text{ мкм}$, $\lg \sigma_n = 1,64$;
- запиленість газу, що надходить на очищення $Z_1 = 1,02 \text{ г/м}^3$;
- густина матеріалу частинок пилу $\rho_{\text{ч}} = 230 \text{ кг/м}^3$;
- потрібний ступінь вловлювання пилу $\eta_{\text{T}} = 96\%$.

Порядок виконання

Вибір типу й розміру циклона проводиться на основі заданих значень витрати газу, фізико-хімічних властивостей пилу, необхідного коефіцієнта очистки, габаритів установки, експлуатаційної надійності та вартості.

Умовам даного завдання відповідає циклон НДЮГАЗ типу ЦН-15, що займає за ефективністю проміжне місце між циклонами типу ЦН-11 і ЦН-24. У такому разі оптимальна швидкість газу в циклоні $v_0 = 3,5$ м/с.

Визначимо площину перерізу циклона (формула 2.1):

$$F = 0,27/3,5 = 0,077 \text{ м}^2.$$

Визначимо діаметр циклонних елементів [формула (2.2)], завдаючи кількість циклонів $N=2$:

$$D = \sqrt{\frac{0,077}{0,785 \cdot 2}} = 0,22 \text{ м.}$$

Найближчий стандартний діаметр циклона 200 мм, визначимо справжню швидкість газу в циклоні [формула (2.3)]:

$$v = \frac{0,27}{0,785 \cdot 2 \cdot 0,22^2} = 3,55 \text{ м/с.}$$

Відхилення від оптимальної швидкості

$$\Delta = ((v_{\text{ум}} - v_{\text{опт}}) / v_{\text{опт}}) \cdot 100 \% ;$$

$$\Delta = \frac{3,55 - 3,5}{3,5} \cdot 100 \% = 1,43 \% ,$$

що не виходить за допустимі межі.

Коефіцієнт гідравлічного опору циклона (формула (2.4), табл. 2.8-2.10)

$$\xi = 0,9 \cdot 1 \cdot 155 + 35 = 174,5.$$

Втрата тиску в циклоні [формула (2.5)]

$$\Delta P = \frac{174,5 \cdot 1,19 \cdot 3,55^2}{2} = 1308,5 \text{ Па.}$$

Розмір частинок, вловлюваних вибраним циклоном на 50% [формула (2.10)]

$$d_{50} = 4,5 \cdot \sqrt{\frac{0,2}{0,6} \cdot \frac{1930}{230} \cdot \frac{19,57 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{3,55}} = 7 \text{ мкм.}$$

Значення x визначимо за формулою (2.8), табл. 2.6:

$$x = \frac{\lg\left(\frac{38}{7}\right)}{\sqrt{0.352^2 + \lg^2 1.64}} = 1,88.$$

Значення функції $\Phi(x)$ (табл. 2.13), що відповідає $x = 1,88$, дорівнює 0,9699.

Ступінь вловлювання пилу циклоном [формула (2.7)]

$$\eta = 100 \cdot \Phi(x) = 96,99 \%,$$

що відповідає потрібному ступеню вловлювання пилу.

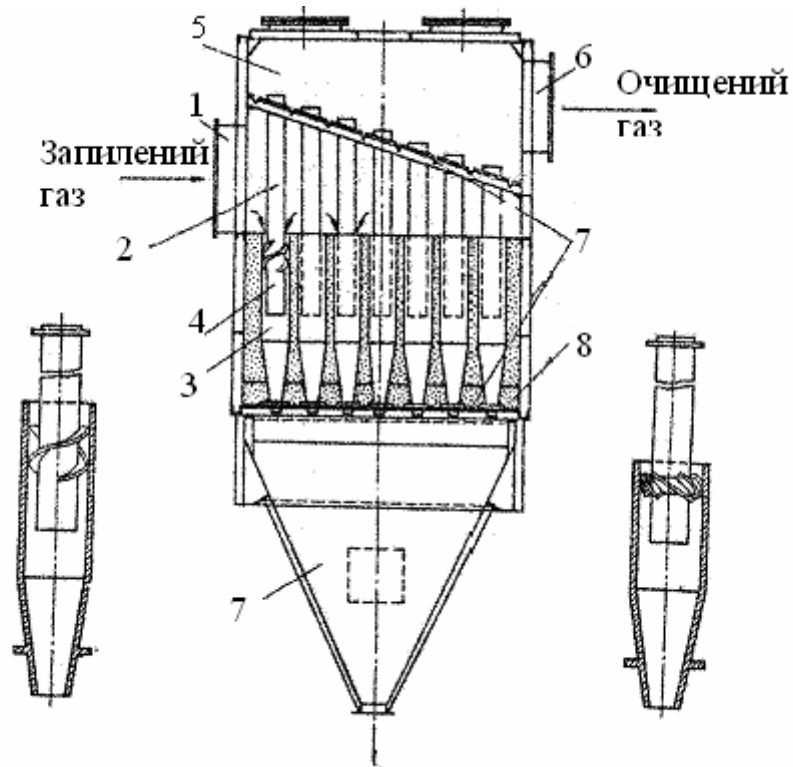
4.3. Конструкції батарейних циклонів та рекомендації щодо їх вибору

Батарейні циклони доцільно застосовувати для очищення газів, витрата яких перевищує 80 000 м³/год. Апарати розраховані на ефективне очищення викидів від пилу, діаметром більше 20 мкм. Батарейний циклон складається з великої кількості паралельно працюючих циклонних елементів, які розміщені в одному корпусі та мають спільний підвід та відвід газів, а також бункер-накопичувач пилу. На відміну від звичайних циклонів обіг газу в елементах батарейного циклона досягається за допомогою спеціальних напрямних апаратів у вигляді “гвинта” чи “розетки”. Через це розміри батарейних циклонів у плані менші, ніж групи циклонів тієї самої продуктивності.

На рис. 2.6 зображено загальний вигляд батарейного циклона з найбільш розповсюдженими напрямними елементами. Очищені гази крізь вхідний патрубок 1 надходять у загальну розподільну камеру 2, а звідти - в окремі циклонні елементи 3. У напрямних апаратах елементи газів, обертаючись, вивільняються від пилу. Очищені гази підіймаються вихлопними трубами 4 в камеру чистого газу 5 і по вихідному патрубку 6 виводяться з апарата. Вловлений пил збирається в загальному бункері 7.

На практиці найбільше застосовуються циклонні елементи діаметром 250 мм. Досвід експлуатації батарейних циклонів показує, що апарати, складені з великої кількості циклонних елементів малого діаметра (100 і 150 мм), працюють не достатньо ефективно й надійно.

Циклонні елементи з напрямними апаратами типу “розетка” забезпечують більший ступінь очищення газу, ніж елементи з напрямними апаратами типу “гвинт”, однак вони більше піддаються забиванню. Елементи обох типів можна застосовувати для вловлювання пилу з адгезійною міцністю шару 20 – 400 Па, при більших значеннях краще застосовувати апарати типу “гвинт”. У зв’язку з підвищенням схильності до забивання розеткові апарати застосовують при невеликих концентраціях пилу в газі.



a

б

в

Рис. 3.7. Схема батарейного циклона (*б*), напрямні апарати типу “гвинт” (*а*) та “розетка” (*в*)

Граничні значення запилення, рекомендовані для різних елементів, та продуктивність циклонних елементів батарейних циклонів приведені в табл. 2.14.

Таблиця 4.14

Характеристики батарейних циклонів

Діаметр циклонного елемента, мм	100	150	250
Витрата газу, м ³ /год	>2 500	>7 500	<250 000
Максимальна запиленість газу, г/м ³ для елемента типу:			
Гвинт	25	50	100
Розетка	15	35	75

Ступінь очищення газу в батарейному циклоні значно залежить від режиму його роботи, тому в умовах змінного об'єму очищуваних газів (приєднання декількох технологічних агрегатів до одного апарата) використовують батарейні циклони з різним числом елементів у секціях.

На різних виробництвах застосовують батарейні циклони типів БЦ-2, ЦБР-150, ПБЦ та ін. Наприклад, батарейний циклон БЦ-2 (рис. 2.6) використовують для знепилення газів, що містять неволокнистий та незлипливий пил. Залежно від типорозміру вони мають 20-56 циклонних елементів діаметром 254 мм з направляючими апаратами типу "розетка". Кожний апарат містить 2 секції, що працюють паралельно. Технічні характеристики такого апарата наведено в табл. 2.15 і 2.16.

Таблиця 4.15

Параметри циклона БЦ-2

Припустима концентрація пилу в газі, г/м ³ :	
- для пилу, що слабо злипається	75
- для пилу із середньою злипаемістю	35
Температура газу, °С	<400
Максимальне розрідження, кПа	15
Коефіцієнт гідравлічного опору	65
Ефективність очищення (d=10 мкм), %	80

Таблиця 2.16

Витратні та масові характеристики циклонних апаратів БЦ-2

Типорозмір	Витрати газу, 10 ² м ³ /год при		Маса, кг
	ΔP = 0,45 кПа	ΔP = 0,6 кПа	
БЦ-2-4·(3+2)	150	174	3 530
БЦ-2-5·(4+2)	226	261	4 850
БЦ-2-6·(4+2)	272	314	5 600

БЦ-2-7·(5+3)	422	490	7 950
--------------	-----	-----	-------

Примітки. БЦ – батарейний циклон; 2 – кількість секцій; наступна цифра – кількість рядів за глибиною; цифри в дужках – кількість циклонних елементів у кожній з двох секцій (за шириною).

Слід зауважити, що кількість циклонних елементів в одному ряді за ходом газу, об'єднаних загальним бункером, не повинна перевищувати 10, а в ряду, перпендикулярному до потоку газу – 16. Проте в останньому випадку, починаючи з 12 елементів у ряду, пиловий бункер слід поділити перегородкою на дві частини.

Перевага батарейних циклонів перед звичайними полягає в такому:

- батарейні циклони можуть очищувати велику кількість газів, що неможливо при встановленні групи одиночних циклонів;
- при однакових витратах газу, що надходить на очищення, батарейний циклон значно компактніший за групи одиночних циклонів.

Основні недоліки батарейних циклонів:

- підвищена металомісткість, що становить 200...500 кг металу на очищення 1 000 м³/год газу, що майже вдвічі більше, ніж при використанні одиночних циклонів;
- менша надійність в експлуатації через можливість нерівномірного розподілу газу між циклонними елементами й підсмоктування газу через загальний бункер;
- залипання напрямних апаратів при запиленості очищувального газу, що перевищує 10 г/м³.

4.3.1. Методика розрахунку батарейних циклонів

1. Визначаємо втрати тиску ΔP в батарейному циклоні [формула (2.5)], де густина газу ρ за робочих умов визначається за формулою (1.16).

Для напрямних апаратів типу „гвинт” коефіцієнт гідравлічного опору $\xi = 85$; для апарата типу „розетка” з вісьмома лопатками нахиленими під кутом $\alpha = 25$ і 30° , ξ дорівнює 90 і 65 відповідно.

Умовна швидкість газу $v_{ум}$, м/с:

$$v_{ум} = \frac{4\dot{V}_1}{\pi \cdot D^2}, \quad (2.11)$$

де \dot{V}_1 – витрата газу через один циклонний елемент за робочих умов, м³/с;

D – діаметр циклонних елементів, м.

Для батарейних циклонів оптимальні значення умовної швидкості:

$$\text{при } \xi = 85-90 \quad v_{\text{ум}} = 3,85 \text{ м/с};$$

$$\text{при } \xi = 65 \quad v_{\text{ум}} = 4,5 \text{ м/с}.$$

Значення умовної швидкості газу за робочих умов не повинно відхилятися від оптимального більше, ніж на $\pm 15\%$.

Витрати газу через один циклонний елемент, м³/с

$$\dot{V}_1 = v_0 \frac{\pi D^2}{4}, \quad (2.12)$$

2. Потрібна кількість циклонних елементів

$$N = \frac{\dot{V}}{\dot{V}_1}, \quad (2.13)$$

де \dot{V} - сумарна витрата газу через циклонний апарат.

3. Ступінь вловлювання пилу в елементі батарейного циклона визначаємо за залежностями (2.7-2.9).

Потрібні для цих розрахунків параметри d_{50}^T і $\lg \sigma^T$ наведені в табл. 2.17.

Таблиця 2.17

Параметри, що визначають ступінь вловлювання пилу елементами батарейних циклонів

Тип напрямного апарата	Елемент		d_{50}^T , мкм	$\lg \sigma^T$
	Кут нахилу α , град.	Діаметр D, м		

Гвинт	25	250	4,5	0,46
Розетка	25	250	3,85	0,46
-//-	30	250	5,0	0,46
-//-	25	150	3,38	0,46
-//-	25	100	3,0	0,46

Розмір частинок, вловлених елементами батарейного циклона за фактичних умов роботи на 50%, мкм

$$d_{50} = d_{50}^T \left(\frac{\rho_{1T}}{\rho_1} \cdot \frac{\mu}{\mu_T} \cdot \frac{v_T}{v} \right)^{0.5}, \quad (2.14)$$

де d_{50}^T (за табл. 2.17), ρ_1, μ, v – параметри, що відповідають фактичним умовам роботи; ρ_{1T}, μ_T, v_T – параметри, що відповідають умовам, узятим для умовного елемента батарейного циклона: $\rho_{1T} = 2\,200 \text{ кг/м}^3$, $\mu_T = 23,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $v_T = 4,5 \text{ м/с}$.

Одержане значення d_{50} застосовують для обчислення x [формула (2.8)], за табл. 2.13 визначається $\Phi(x)$. Обчислений за формулою (2.11) ступінь вловлювання пилу елементом батарейного циклона зіставляється з потрібним значенням. У разі потреби ступінь вловлювання пилу можна збільшити, змінивши діаметр елемента батарейного циклона, або вибравши більш ефективний тип прямого апарата.

4.2.3. Приклад розрахунку

Завдання

Розрахувати батарейний циклон для очищення газів ливарного цеху машинобудівного підприємства (очищення чавунного литва) за таких вихідних даних:

- кількість газу, що йде на очищення за нормальних умов $\dot{V}_0 = 100\,000 \text{ м}^3/\text{год}$;
- густина газу за нормальних умов $\rho_0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$;
- температура газу $t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$;
- в'язкість газу за робочих умов $\mu = 19,57 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- розрідження в циклоні $P = 8 \text{ кПа}$;

- запиленість газу, що йде на очищення $z = 7,3 \text{ г/м}^3$;
- густина пилу $\rho = 4670 \text{ кг/м}^3$;
- дисперсний склад:

d, мкм	<6,3	6,3-10	10-16	16-25	25-40
масова частка, %	6	8	8	28	50

Порядок виконання

Визначимо густину газу за робочих умов [формула (1.16)]:

$$\rho = 1,29 \frac{273 \cdot (101325 - 8000)}{(273 + 22) \cdot 101325} = 1,1 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата газу за робочих умов [формула (1.18)]

$$\dot{V}_1 = 100000 \frac{1,29}{3600 \cdot 1,1} = 32,6 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Виходячи з рекомендацій щодо вибору циклонного елемента, візьмемо елемент з $D = 250 \text{ мм}$ із напрямним апаратом типу “розетка” з $\alpha = 30^\circ$.

Оптимальна швидкість газу в циклонному елементі в такому разі становить $4,5 \text{ м/с}$, а витрати газу через один циклонний елемент [формула (2.12)]

$$\dot{V}' = 4,5 \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} = 0,22 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Потрібна кількість циклонних елементів [формула (2.13)]

$$N = \frac{32,6}{0,22} = 148,2.$$

Виберемо батарейний циклон з кількістю елементів 150 (БЦ-2·10·(7+8)). Тоді умовна швидкість газу в циклонних елементах [формула (2.11)]

$$v_{ум} = \frac{4 \cdot 0,22}{3,14 \cdot 0,25^2} = 4,48 \text{ м/с}.$$

Відхилення від оптимальної швидкості

$$\Delta = \frac{4,5 - 4,48}{4,5} = 0,44 \%,$$

тобто не виходить з рекомендованих границь.

Гідравлічний опір батарейного циклона [формула (2.5)]

$$\Delta P = 65 \cdot 1,1 \frac{4,48^2}{2} = 717,5 \text{ Па} .$$

Ступінь уловлювання пилу вибраним циклонним елементом на 50% [формула 2.14)]

$$d_{50} = 5 \cdot \left(\frac{2\,200}{4\,670} \cdot \frac{19,57 \cdot 10^{-6}}{23,7 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{4,5}{4,48} \right)^{0,5} = 3,125 \text{ мкм}$$

За заданим фракційним складом пилу побудуємо інтегральну криву (рис.2.7), що показує відносний вміст частинок пилу з розмірами, меншими за заданий. На осі ординат відкладають процент (за масою) частинок, що проходять крізь сито з отворами зазначених на осі абсцис розмірів.

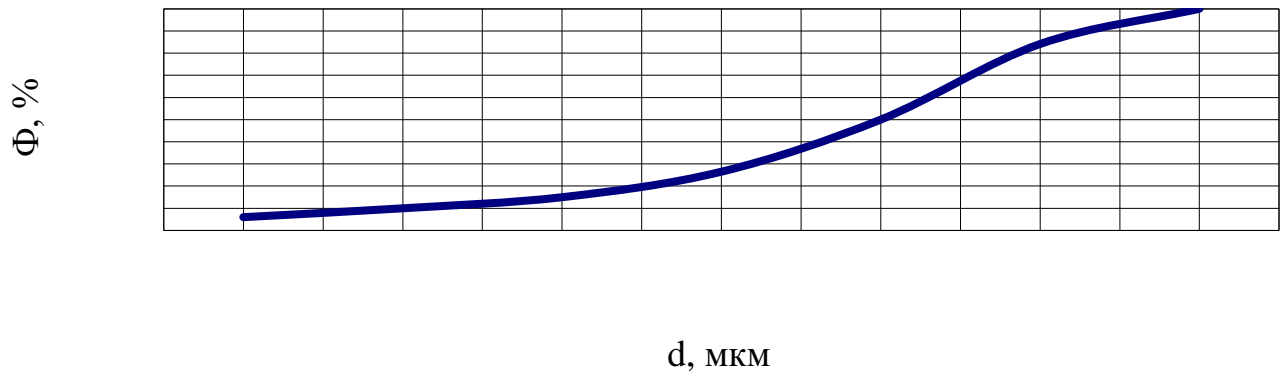


Рис. 4.8. Інтегральна крива, що відображає дисперсний (фракційний) склад пилу

Середнє квадратичне відхилення функції розподілу вловлених частинок пилу (2.8)

$$\lg \sigma_n = \lg \frac{25}{11} = \lg 2,083 \approx 0,356$$

Підставивши числові значення з таблиці у формулу , дістанемо

$$x = \frac{\lg \frac{25}{3,125}}{(0,46^2 + 0,356^2)^{0,5}} = \frac{0,903}{0,582} = 1,55 .$$

Значення функції $\Phi(x)$ (табл. 2.13), що відповідає $x = 1,55$, дорівнює 0,94. Ступінь уловлення пилу

$$\eta = 100 \cdot 0,94 = 94\%.$$

4.4. Фільтраційне очищення газів

В основі роботи всіх різновидів фільтрів лежить процес фільтрації газу крізь пористу перетинку – фільтруюче середовище, у ході якого тверді частинки затримуються в ній, а газ повністю проходить.

Найбільш розповсюдженими гнучкими пористими перетинками слугують тканинні матеріали з природних синтетичних та мінеральних волокон.

Тканинні фільтри розрізняються між собою за такими показниками:

- форма фільтрувальних елементів (рукавні, плоскі) та існування в них опорних пристроїв (каркасні, рамні);
- місце розташування вентилятора відносно фільтра (всмоктуючі – ті, що працюють під розрядженням та нагнітаючі – працюють під тиском);
- засіб регенерації тканини (механічні: струшування, крутіння, качання, струмування; пневматичні: зворотне, посекційне, імпульсне або ступеневе, двобічне імпульсне продування; комбіновані: струшування та зворотна продувка);
- кількість секцій в обладнанні (однокамерні та багатосекційні);
- вид використовуваної тканини (лавсанові, нітронові, оксалоніві тощо).

На рис. 3.1 показана типова конструкція багатосекційного рукавного фільтра із регенерацією струшуванням та зворотною продувкою (типу Г4-БФМ).

Гази

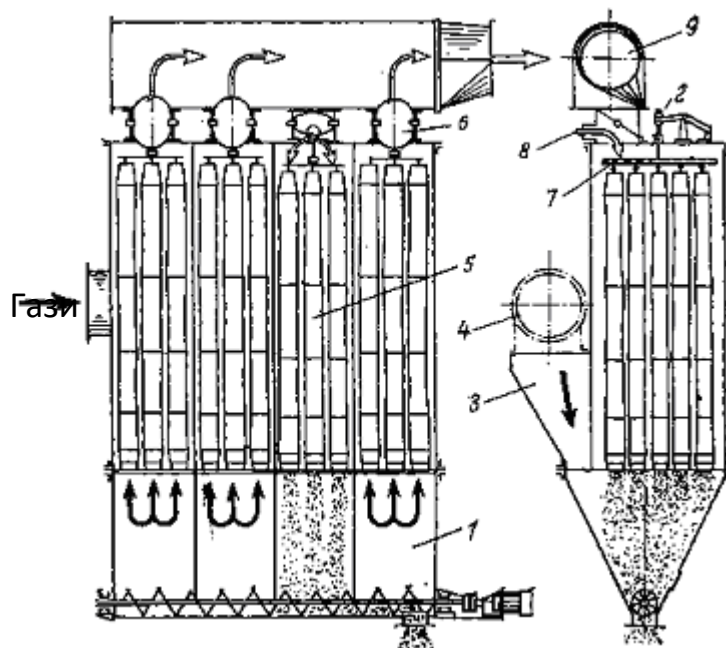


Рис. 4.9. Багатосекційний рукавний фільтр із струхуванням та зворотною продувкою типу Г4-БФМ:

- 1- бункер; 2- механізм струхування; 3- колектор; 4- газохід запилених газів;
5- секція фільтра, яка знаходиться на регенерації; 6- клапан; 7- рама підвісу рукавів; 8- продувочний клапан; 9- вихідний колектор

Корпус розділений на декілька герметизованих секцій, у кожній з яких розташовано кілька рукавів. Запилений газ по колектору 3 надходить у бункер 1 і розподіляється між рукавами 5.

Фільтруючись крізь тканину, газ проходить у секцію й через відкритий випускний клапан 6 виходить із неї, поступаючи в газохід чистого газу 9. Частинки пилу осідають на внутрішній поверхні рукава, унаслідок чого підвищується опір тканини проходу газу. Коли опір досягне деякого граничного значення, фільтр переводиться на режим регенерації. Регенерація проводиться зворотною продувкою повітрям, яке крізь відкритий продувочний клапан 8 направляється в середину секції при закритому випускному клапані. З метою підвищення ефективності регенерації одночасно з продуванням струшують рукава за допомогою спеціального механізму 2. Секції фільтра переводять на регенерацію за чергою.

Звичайно в тканинних фільтрах застосовують фільтрувальні рукави діаметром 135-280 мм (не більше 600), довжиною 2,4 – 3,4 м. Найчастіше співвідношення довжини й діаметра (16 – 20):1. Для роботи під тиском за невеликих витрат газів використовують циліндричні корпуси, у яких бункер

застосовують для попереднього вловлення крупних фракцій пилю. Корпуси вбираючих фільтрів працюють при розрядженні до 3 кПа, іноді до 10 кПа. У деяких установках кількість рукавів доходить до 1 000. Розповсюджено 2 типи секцій – з невеликою кількістю рукавів (8 – 15) та укрупнені (до 100). Кількість секцій 10 – 12 .

Фільтрувальні елементи рукавних фільтрів виготовляють із фільтрувальної тканини, вибір якої визначається такими факторами:

характеристика газів, що йдуть на очищення (середня об'ємна витрата за робочих умов; склад газів, їх вибухонебезпечність, температура та тиск, кількість вологи та ін.);

властивості пилю (тип пилю, розподіл за розмірами, середня концентрація, хімічний склад тощо);

основні вимоги до фільтрів (допустимий опір фільтра; потрібний ступінь вловлювання пилю, габаритні розміри фільтра та ін.).

Деякі властивості фільтрувальних тканин наведені у табл. 3.1.

Таблиця 4.1

Параметри фільтрувальних тканин

Тканина	Термостійкість, °С	Стійкість протидії		Поруватість частинки	Питомий гідравлічний опір, Па
		щодо кислот	щодо лугів		
Бавовна	65...80	Низька	Висока	0,6	---
Вовна ЧШ	80...100	Невисока	Низька	0,86...0,91	$0,84 \cdot 10^5$
Нітрон НЦМ	120	Висока	Невисока	0,83	$1,8 \cdot 10^5$
Лавсан	140	---/---	---/---	0,75	$3,5 \cdot 10^5$
Скло	250...300	---/---	---/---	0,55	$8,4 \cdot 10^5$
Оксалон	250	---/---	---	---	$7,2 \cdot 10^5$

Найбільш розповсюджені типи фільтрів наведені в табл. 3.2.

Таблиця 4.2

Типи фільтрів та напрямки їх застосування

№	Тип фільтра	Напрямки застосування	Метод регенерації	Тип фільтрувального матеріалу
1	2	3	4	5
I	Фільтри з пневматичними методами регенерації			

1	ФРКІ (фільтр рукавний каркасний з імпульсним продуванням)	Металургія, виробництво будівельних матеріалів, харчова, хімічна промисловість	Імпульсне продування тривалістю 0,1-0,2 с, надлишковий тиск 0,3-0,6 МПа	Лавсан, нітрон
2	ФРКДІ (фільтр рукавний каркасний з двобічним імпульсним продуванням)	Металургія, виробництво будівельних матеріалів, харчова, хімічна промисловість	Двобічне імпульсне продування тривалістю 0,1-0,3 с, надлишковий тиск 0,5-0,6 МПа	Лавсан, нітрон
3	ФРЗ (фільтр рукавний із зворотним продуванням)	Машинобудування, металургія, заводи будівельних матеріалів	Зворотне продування з витратою повітря 0,1-0,2% від кількості очищуваних газів	Лавсан, склотканина, будь-яка інша синтетична тканина
II	Фільтри з регенерацією механічним струшуванням			
1	ФР-6П (фільтр рукавний)	Очищення аспіраційного повітря різних виробництв	Механічне струшування	Бавовна, вельветон
III	Фільтри з комбінованим приладом регенерації			
1	ФРУ	Хімічна промисловість, вибухонебезпечні системи	Механічне струшування й зворотне продування	Лавсан або тканина з кращими властивостями

Закінчення табл. 3.2

1	2	3	4	5
2	СМЦ	Цементна промисловість, виробництво будівельних матеріалів	Механічне струшування й зворотне продування	Склотканина, лавсан
3	УРФМ (укрупнений рукавний фільтр модернізований)	Кольорова і чорна металургія	Механічне струшування й зворотне продування	Оксалон, нітрон

4	Г4-БФМ	Металургія, аспіраційні прилади, пневмотран- спортування та в ін. різних галузях	Механічне струшування й зворотне продування	Оксалон, нітрон, лавсан, склотканина
---	--------	--	--	--

Конструкції деяких фільтрів та їх технічні характеристики наведені на рис. 3.1 - 3.3, у табл. 3.3 - 3.4.

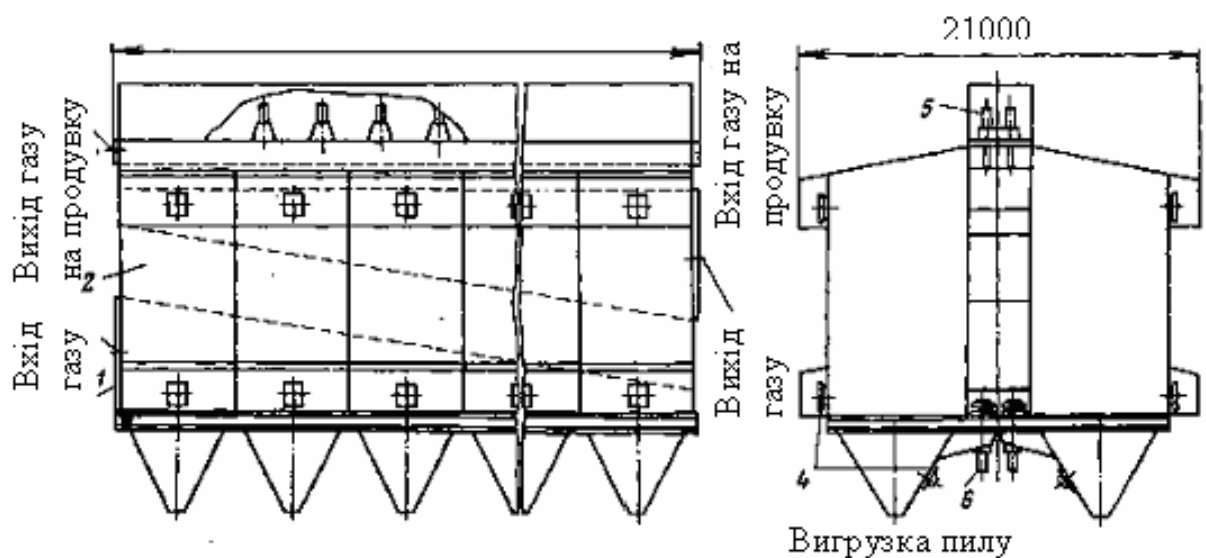


Рис 4.10. Рукавні фільтри типу ФРО:

1-колектор, що підводить газу; 2- корпус; 3- бункер; 4- люки; 5- клапан для газу, яким продувають рукави; 6- клапан для запиленого газу

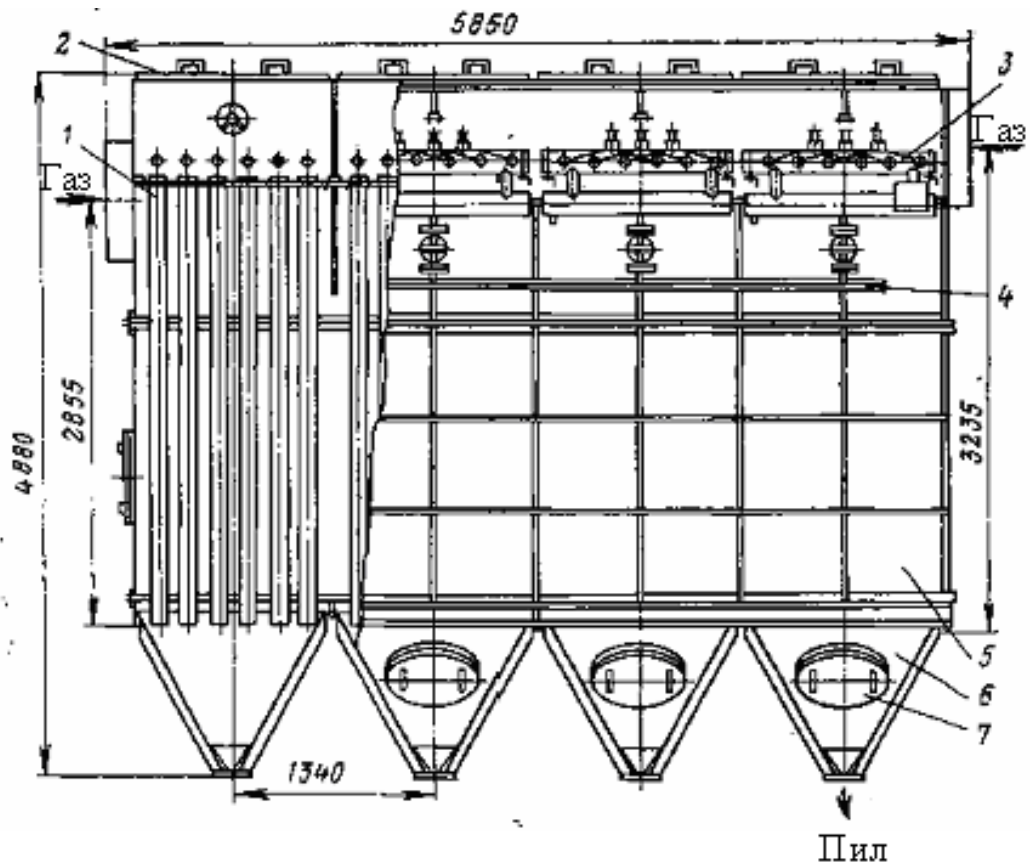


Рис. 4.11. Рукавний фільтр ФРКІ-360:

1- рукав; 2- кришка; 3- клапанна секція; 4- колектор; 5- корпус; 6- бункер; 7- люк

Таблиця 3.3

Технічні характеристики фільтрів ФРКІ

Показники	ФРКІ-30 ФРКН-В-30	ФРКІ-60 ФРКН-В-60	ФРКІ-90 ФРКН-В-90	ФРКІ-180	ФРКІ-360
1	2	3	4	5	6
Площа фільтрувальної поверхні, м ²	30	60	90	180	360
Кількість рукавів	36	72	108	144	288
Діаметр рукава, мм	130				
Кількість електромагнітних клапанів, м	6	12	18	24	48
Кількість секцій	1	2	3	4	8
Питоме газове навантаження, м ³ /(м ² ·хв)			1,2-2		

Гідравлічний опір, Па	1 000-1 500
-----------------------	-------------

Закінчення табл. 3.3

1	2	3	4	5	6
Тиск продувального повітря, МПа	0,3; 0,6				
Максимальні витрати зжатого повітря, м ³ /год	10	20	30	40	80
Габаритні розміри, мм:					
Довжина	1458	2820	4140	5480	5850
Ширина	2060	2060	2060	2060	4370
Висота	3620	3620	3620	4620	4880
Маса, т	1,3	2,5	3,5	5,5	10,5

Таблиця
3.4

Технічні характеристики фільтрів ФРЗ

Показники										
	ФРЗ-1250-1	ФРЗ-1650-1	ФРЗ-2500-1	ФРЗ-4100-2	ФРЗ-5100-2	ФРЗ-6000-2	ФРЗ-7000-2	ФРЗ-8000-2	ФРЗ-2000-3	ФРЗ-2400-3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Площа фільтрувальної поверхні, м ²	1 266	1 688	2 530	4 140	5 130	6 156	7 182	8 208	20 520	24 624
Кількість рукавів	252	336	504	432	540	648	756	864	2 160	2 592
Число секцій	6	8	12	8	10	12	14	16	10	12
Висота рукава, м	8	8	8	10	10	10	10	10	10	10
Діаметр рукава, м	200	200	200	300	300	300	300	300	300	300
Габаритні розміри, мм:										

ДОВЖИНА	5 100	6 600	9 600	12 600	15 600	18 600	21 600	24 600	30 400	36 400
---------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Закінчення табл. 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ширина	6 840	6 840	6 840	9 840	9 840	9 840	9 840	9 840	21 000	21 000
висота	13 770	13 770	13 770	16 200	16 200	16 200	16 200	16 200	22 640	22 640
Маса, т	37,8	50,4	75,59	108,5	136	162,8	190	217	540	650

Слід зауважити, що припустима концентрація пилу в очищуваному газі для наведених фільтрів складає 50 г/м^3 . Питоме навантаження на фільтрувальну тканину (співвідношення між витратою газу й площею фільтрування) для різних фільтрів та тканин звичайно складає $0,5 - 2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв.})$. Опір фільтра перед регенерацією $0,75 - 1,5 \text{ кПа}$, іноді $2 - 2,5 \text{ кПа}$.

4.4.2. Методика розрахунку рукавного фільтра

Основним чинником, який визначає потрібну площу фільтрувальної тканини в апараті, слугує перепад (втрата) тиску на тканині, що залежить від швидкості фільтрування (питомого навантаження на фільтрувальну тканину), частоти регенерації та ін.

Рекомендовані швидкості фільтрування в рукавних фільтрах наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Значення швидкості фільтрування, м/с

Клас пилу	Вид пилу	Регенерація фільтра		
		струшуванням і продуванням	імпульсним продуванням	зворотним продуванням
1	2	3	4	5

1.	Сажа, кремнезем /біла сажа/, перегони свинцю, цинку, активоване вугілля, цемент	0,0075...0,01	0,0133...0,0333	0,0055...0,0075
2.	Перегони заліза, феросплавів, ливарний пил, вапно, глинозем	0,01...0,0125	0,025...0,00417	0,0075...0,00917

Закінчення табл. 3.5

1	2	3	4	5
3.	Кам'яне вугілля, вапняк, рудний пил, фрита емалей	0,0117...0,013 3	0,0333...0,0583	0,01...0,015
4.	Азбест, волокнистий пил, солі, пил шліфувальних процесів	0,0133...0,025 8	0,0417...0,075	---
5.	Тютюн, деревний пил, грубі рослинні волокна (коноплі, джут та ін.)	0,015...0,0333	0,0417...0,1	---

У фільтрі, що складається з N секцій, площа фільтрувальної поверхні однієї секції, m^2

$$S_1 = \frac{\dot{V}_1}{v \cdot (N - N_1) - N_1 \cdot v_p}, \quad (3.1)$$

де \dot{V}_1 – витрата газу за робочих умов, що знаходиться на очищення, m^3/c ;
 v – швидкість фільтрування, m/c ; N_1 – кількість секцій фільтра, що одночасно перебувають у режимі регенерації; v_p – швидкість газу за регенерації зворотним продуванням, m/c .

Загальна площа фільтрувальної поверхні, m^2

$$S = N \cdot S_1. \quad (3.2)$$

Звичайно питоме навантаження на фільтрувальну тканину в процесі регенерації зворотним продуванням у 1,5 – 2 рази перевищує навантаження при фільтруванні, тобто $v_p/v = 1,5 - 2,0$.

Щоб уникнути інтенсивного очищення, для синтетичних і скляних тканин це відношення застосовують трохи меншим. При регенерації фільтра струшуванням або імпульсним продуванням у формулі (3.1) $v = 0$. Витрата газу на імпульсне продування, як уже зазначалося, звичайно не перевищує (0,1 – 0,2) % кількості газу, що надходить на очищення, і враховується відповідним збільшенням \dot{V}_1 у формулі (3.1).

Обчисливши за (3.1) і (3.2) площу фільтрувальної поверхні, вибирають за каталогами відповідний фільтр або групу фільтрів і визначають фактичну швидкість фільтрування, м/с:

$$v_1 = \frac{\dot{V}_1 + N_1 \cdot S_1 \cdot v_p}{S_1 \cdot (N - N_1)}. \quad (3.3)$$

Утрата тиску у фільтрі (фільтрованому елементі), Па

$$\Delta P = \frac{817 \mu \cdot v_1 \cdot (1 - m)}{d_m^1 \cdot m^3} \left[0.82 \cdot 10^6 \cdot d_m^{0.25} \cdot m_1^3 \cdot (1 - m) \cdot h^{2/3} + \frac{z_1 \cdot v_1 \cdot \tau}{\rho_1} \right], \quad (3.4)$$

де μ – динамічна в'язкість газу за робочих умов, Па·с; m – пористість шару пилу, частинки; d_m – середній розмір частинок пилу, m_1 – поруватість фільтрувальної тканини, частинки; h – питомий гідравлічний опір нової (чистої) тканини, віднесений до товщини, що дорівнює 1 м при швидкості фільтрування повітря 1 м/с, Па ; z_1 – запиленість очищуваного газу, кг/ м³; значення m_1 і h див. табл. 3.1.

Поруватість шару пилу m залежить від режиму фільтрування, величини й властивостей пилу, вологості й температури газу та деяких інших чинників. В умовах металургійного виробництва величина $m = 0,8 - 0,95$.

При заданому значенні втрати тиску у фільтрі залежність (3.4) дає можливість визначити час між регенераціями фільтра або швидкість фільтрування.

4.4.4. Приклад розрахунку

Завдання.

Розрахувати рукавний фільтр для очистки повітря від пилу печей при виробництві кремнію на алюмінієвому заводі за таких вихідних даних:

- об'ємна витрата очищуваного газу за робочих умов

$$\dot{V}_1 = 40 \text{ м}^3/\text{с};$$

- запиленість газу, що йде на очищення $z_1 = 1,2 \text{ г}/\text{м}^3$;
- густина пилу $\rho_1 = 3 \cdot 200 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- середній медіанний розмір частинок пилу $d_m = 0,65 \text{ мкм}$;
- поруватість шару пилу $m = 0,85$;
- температура газу $t = 120 \text{ }^\circ\text{C}$;
- динамічна в'язкість газу за нормальних умов $\mu = 17,8 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$;
- припустимий опір фільтра $\Delta P = 1,5 \text{ кПа}$.

Порядок виконання

Відповідно до завдання доцільно вибрати фільтр із лавсану, термостійкість якого приблизно $140 \text{ }^\circ\text{C}$. У такому разі поруватість тканини $m_1 = 0,75$, а питомий опір $h = 3,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Згідно з рекомендацією для вловлювання пилу виробництв кольорової металургії з урахуванням різновиду пилу виберемо фільтр УРФМ із зворотним продуванням та механічним струшуванням. Цей фільтр складається з 20 секцій, які мають загальну площу фільтрувальної поверхні $2 \cdot 300 \text{ м}^2$.

Відповідно до табл. 3.5 для очищення повітря від пилу виробництва кремнію ($d_m = 0,65 \text{ мкм}$) і способу регенерації вибраного фільтра слід узяти швидкість фільтрування $v = 0,01 \text{ м}/\text{с}$. Тоді необхідна площа фільтрувальної поверхні [формули (3.1),(3.2)]

$$S = \frac{20 \cdot 40}{0,01 \cdot (20 - 1) - 1 \cdot 2 \cdot 0,01} = 4 \cdot 705 \text{ м}^2,$$

де $v_p = 2 \cdot v$ і $N_I = 1$.

Візьмемо до установки два фільтри УРФМ, оскільки

$$4705 : 2300 \approx 1,96.$$

У двох фільтрах у режимі регенерації одночасно перебуватимуть дві секції ($N_I = 2$) і фактична швидкість фільтрування [формула (3.3)]

$$v_1 = \frac{40 + 2 \cdot 115 \cdot 0,02}{115 \cdot (40 - 2)} = 0,0102.$$

Звідси $S_1 = 2300 : 20 = 115 \text{ м}^2$, а $v_p = 2 \cdot 0,01 = 0,02 \text{ м}/\text{с}$.

При заданих утраті тиску у фільтрі $\Delta P = 1,5$ кПа і фактичній швидкості фільтрування $v_1 = 0,0102$ м/с час між регенераціями фільтра [формула (3.4)]

$$\tau = \frac{\rho_1 \cdot (\Delta P - AB)}{Az_1 v_1}, \quad (3.5)$$

де A і B – параметри, які визначаються за наступними залежностями:

$$A = \frac{817 \cdot \mu \cdot v_1 \cdot (1-m)}{d_m^2 m^3}, \quad (3.6)$$

$$B = 0,82 \cdot 10^{-6} d_m^{0,25} m_1^3 (1-m) h^{2/3}. \quad (3.7)$$

Динамічна в'язкість за робочих умов [формула 1.17]

$$\mu = 17,8 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(273+124)}{(393+124)} \cdot \left(\frac{393}{273}\right)^{1,5} = 23,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Тоді

$$A = \frac{817 \cdot 23,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0102 \cdot (1-0,85)}{(0,65 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,85^3} = 1,13 \, 695 \cdot 10^8,$$

$$B = 0,82 \cdot 10^{-6} (0,65 \cdot 10^{-6})^{0,25} \cdot 0,75^3 (1-0,75) \cdot (3,5 \cdot 105)^{2/3} = 1,21 \cdot 10^{-5}.$$

Швидкість фільтрування

$$\tau = \frac{3 \, 200 \cdot (1 \, 500 - 1,13 \, 695 \cdot 10^8 \cdot 1,21 \cdot 10^{-5})}{1,13 \, 695 \cdot 10^8 \cdot 0,0012 \cdot 0,0102} = 286 \text{ с} \approx 5 \text{ мин}.$$

Це цілком прийнятний час між регенераціями. Чим більше τ , тим довше служитиме фільтрувальна тканина й легше організувати по черзі регенерацію секцій фільтра.