

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

В. Є. Бекетов, О. С. Ломакіна

ТЕХНОЛОГІЇ СУХОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОЧИСТКИ ГАЗІВ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища)

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2024

Бекетов В. Є. Технології сухої механічної очистки газів : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища / В. Є. Бекетов, О. С. Ломакіна ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 75 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. В. Є. Бекетов
ст. викл. О. С. Ломакіна

Рецензент

Ю. Л. Коваленко, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної екології міст (Харківський національний університет імені О. М. Бекетова)

*Рекомендовано кафедрою інженерної екології міст, протокол № 2
від 28.08.2023*

© В. Є. Бекетов, О. С. Ломакіна, 2024
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Основні заходи з охорони повітря	6
1.1 Заходи у сфері охорони атмосферного повітря	6
1.1.1 Санітарно-захисна зона	6
1.1.2 Інженерно-організаційні заходи	9
1.1.3 Архітектурно-планувальні заходи	9
1.1.4 Маловідходні та безвідходні технології	11
1.1.5 Технічні засоби та технології очистки газів	12
1.2 Класифікація систем пило- й газоочистки. Ефективність апаратів очистки газів	12
1.2.1 Технології і способи очистки газів від аерозолів і газоподібних домішок	12
1.2.2 Показники ефективності очистки	13
2 Механічна очистка газів	18
2.1 Фізичні основи гравітаційного й інерційного осадження пилу. Гравітаційні й інерційні пиловловлювачі.....	18
2.1.1 Фізичні основи гравітаційного та інерційного осадження пилу.....	18
2.1.2 Пилоосаджувальні камери	20
2.1.3 Жалюзійні пиловловлювачі.....	22
2.1.4 Інерційні пиловловлювачі	24
2.2 Основи теорії апаратів відцентрової дії. Апарати відцентрової дії.....	25
2.2.1 Параметри ефективності відцентрового пиловловлення	25
2.2.2 Циклони, батарейні циклони	27
2.2.3 Практичні рекомендації з вибору та розрахунку циклонів	31
2.2.4 Радіальні пиловловлювачі	34
3 Фільтрація	36
3.1 Фізичні основи очищення газів шляхом фільтрації	36
3.1.1 Характеристики поруватої перетинки	36

3.1.2	Механізми процесу фільтрації	40
3.1.3	Ступінь очищення в поруватому фільтрі	44
3.1.4	Гідравлічний опір поруватого фільтра	47
3.2	Застосування фільтрів у промисловості	49
3.2.1	Тканинні фільтри	49
3.2.2	Волокнуваті фільтри	52
3.2.3	Зернуваті фільтри	53
4	Електричне очищення газів	56
4.1	Фізичні основи електричного очищення газів	56
4.1.1	Стадії електричного очищення	56
4.1.2	Критична напруга коронного розряду	57
4.1.3	Вольт-амперна характеристика	58
4.2	Електрофільтри	59
4.2.1	Конструкції електрофільтрів	60
4.2.2	Агрегати живлення електрофільтра	65
4.2.3	Розрахунок ефективності електрофільтра	67
4.2.4	Фактори впливу на ефективність очищення в електрофільтрі	69
	Список рекомендованих джерел.....	74

ВСТУП

Дисципліна «Технології сухої механічної очистки газів» входить до програми підготовки бакалаврів за спеціальністю 183 – Технології захисту навколишнього середовища.

Дисципліна «Технології сухої механічної очистки газів» надає здобувачам відомості та розвиває практичні навички в галузі використання методів і технологій очистки газів від твердих домішок, необхідних при вирішенні інженерних завдань як підґрунтя для прийняття правильних проєктних та технологічних рішень у галузі захисту навколишнього середовища

У конспекті надано:

- характеристику основних заходів, що використовуються для охорони повітря;
- фізичні основи очистки газів, зокрема, гравітаційного та інерційного осадження пилу, очищення газів фільтрацією та електричного очищення газів;
- наведено будову, принцип дії, основи розрахунку та особливості використання апаратів сухої очистки газів.

1 ОСНОВНІ ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПОВІТРЯ

1.1 Заходи у сфері охорони атмосферного повітря

1.1.1 Санітарно-захисна зона

Об'єкти, які є джерелами виділення в навколишнє середовище забруднюючих речовин або речовин з неприємним запахом, потрібно відокремлювати від житлової забудови санітарно-захисними зонами (далі – СЗЗ).

Розміри СЗЗ до межі житлової забудови встановлюють залежно від:

- а) потужності підприємства;
- б) умов здійснення технологічного процесу;
- в) особливостей та кількості забруднюючих речовин, які виділяються в атмосферу.

Відповідно до санітарної класифікації промислових підприємств встановлено п'ять класів СЗЗ, наведених у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класи СЗЗ підприємств

Клас підприємства	Розмір санітарно-захисної зони, м
IA	3 000
IB	1 000
II	500
III	300
IV	100
V	50

За наявності несприятливих умов для розсіювання домішок в атмосфері та/або неможливості зниження обсягу викидів СЗЗ може бути збільшена, але не більш ніж у 3 рази.

Розміри СЗЗ можна зменшити за наявності високоефективних пристроїв з очищення газів, що повинно підтверджуватися розрахунками та лабораторними дослідженнями і узгоджено у встановленому порядку.

СЗЗ не можна розглядати як резервну територію і використовувати її для збільшення промислового майданчика.

На території СЗЗ допускається розміщення:

- а) об'єктів більш низького класу шкідливості порівняно з основним виробництвом;
- б) складів;
- в) гаражів;
- г) автостоянок;
- д) адміністративних будов;
- е) науково-дослідних лабораторій.

Розмір СЗЗ до межі житлової забудови, дитячих, навчальних, лікувальних, спортивних, оздоровчих закладів, об'єктів зеленого господарства, міст відпочинку потрібно встановлювати так:

- а) для підприємств з технологічними процесами, які є джерелами забруднення атмосферного повітря, безпосередньо від джерела забруднення;
- б) для підприємств з технологічними процесами, які є джерелами шуму, вібрації, електромагнітних хвиль, радіочастот, від забудов, споруд і майданчиків, де встановлено це обладнання;
- в) для електростанцій та котелень – від димових труб;
- г) для санітарно-технічних споруд, сільськогосподарських підприємств – від межі об'єкта.

Територія СЗЗ повинна бути благоустроєною та озелененою.

З боку селітебної території потрібно передбачати полосу деревинно-чагарникових насаджень із шириною не менш ніж 50 м, а при ширині зони до 100 м – не менш ніж 20 м.

Розміри СЗЗ, встановлені «Державними санітарними правилами планування та забудови населених пунктів», повинні перевірятися шляхом розрахунку забруднення атмосфери з урахуванням перспективи розвитку підприємства і фактичного забруднення атмосферного повітря.

Якщо розрахунково розмір СЗЗ не підтверджується, необхідно приймати рішення про зміну технології, яка передбачає зниження обсягу викидів, перепрофілювання або закриття підприємства.

Розміри СЗЗ, отримані розрахунковим шляхом, повинні уточнюватися окремо для різних напрямів вітру залежно від результатів розрахунку забруднення атмосфери й середньорічної рози вітрів району розташування підприємства за формулою

$$L = L_o \frac{P}{P_o},$$

де L – розрахунковий розмір СЗЗ, м;

L_o – розрахунковий розмір ділянки місцевості в заданому напрямі, де концентрація речовин (з урахуванням фонові) перевищує 1 ГДК_{м.р.};

P – середньорічна повторюваність напрямку вітрів відповідного румба, %;

P_o – повторюваність напрямку вітрів одного румба при круговій розі вітрів, % (наприклад, при восьмирумбовій розі вітрів $P_o = \frac{100}{8} = 12,5\%$).

Якщо відповідно до розрахунку отримані розміри СЗЗ є більшими, ніж розміри, встановлені «Державними санітарними правилами планування та забудови населених пунктів», то необхідно переглянути проєктні рішення і забезпечити виконання їх вимог за рахунок зменшення кількості викидів, збільшення висоти джерел та інших заходів. У випадку, коли не виявлено можливостей забезпечення розмірів СЗЗ, що передбачені санітарними нормами, розміри приймаються відповідно до результатів розрахунку забруднення атмосфери.

1.1.2 Інженерно-організаційні заходи

Основні інженерно-організаційні заходи включають:

а) зниження інтенсивності й організацію руху автотранспорту: будівництво об'їзних та окружних доріг навколо міст та населених пунктів, облаштування розв'язок для перетину доріг на різних рівнях, організацію на основних міських магістралях руху за принципом «зеленої хвилі»;

б) збільшення висоти димових труб, через які здійснюються пилогазові викиди в атмосферу: чим вищою є труба, тим легше відбувається розсіювання газопилових викидів в атмосфері. Якщо димова труба з висотою 100 м дозволяє розсіювати шкідливі речовини в радіусі до 20 км, то труба висотою 250 м збільшує радіус розсіювання до 75 км. Необхідно враховувати, що при здійсненні викидів через високі димові труби збільшується загальне фонове забруднення повітря. Крім того, зі збільшенням труби дуже різко зростає її вартість, тому на практиці не рекомендується будівництво труб із висотою більш ніж 150 м;

в) збільшення швидкості руху газів в димовій трубі: сприяє збільшенню початкового підйому викидів, поліпшенню умов їх розсіювання, хоча при цьому зростає гідравлічний опір димової труби і, відповідно, питомі енерговитрати на транспортування газу.

1.1.3 Архітектурно-планувальні заходи

До архітектурно-планувальних відносять заходи, пов'язані з вибором майданчика для будівництва промислового підприємства, взаємним розташуванням підприємства та житлових кварталів, взаємним розташуванням ділянок підприємства, облаштуванням зелених зон.

Промисловий об'єкт повинен бути розташований на рівному підвищеному місці, яке добре провітрюється вітрами (рис. 1.1).

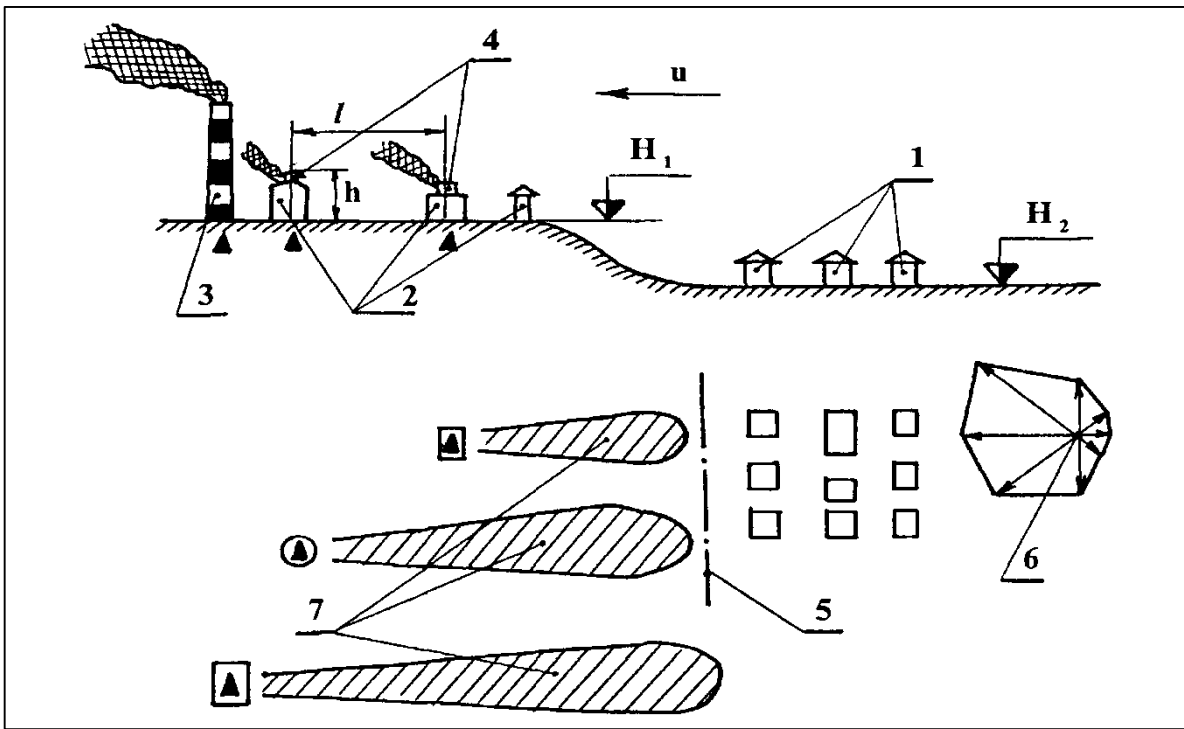


Рисунок 1.1 – Схема розміщення «підприємство-житлова зона»:

- 1 – житлова забудова; 2 – цеха підприємства; 3 – точкове високе джерело;
 4 – лінійні джерела (аераційні ліхтарі); 5 – межа населеного пункту;
 6 – середня роза вітрів теплого періоду року; 7 – факели викидів забруднюючих речовин у випадку вітру в бік житлової забудови

Ділянка житлової забудови не повинна розташовуватися вище за промайданчик підприємства. В іншому разі переваги високих труб для розсіювання шкідливих викидів зводяться нанівець.

Джерела забруднення атмосфери бажано розташовувати за межею населених пунктів і з підвітряного боку від житлових масивів по середній розі вітрів теплого періоду року з метою віднесення викидів вбік від житлових кварталів.

Відстань між виробничими забудовами (l) під час видалення забруднюючих речовин через аераційні ліхтарі повинна становити більш ніж вісім висот (h) попередньо розташованої будови, якщо вона широка ($l > 8h$), і

десяти, якщо вона є вузькою ($l > 10h$). У цьому випадку забруднюючі речовини не будуть накопичуватися в зоні між корпусами.

Цехи, які виділяють найбільшу кількість забруднюючих речовин, потрібно розташовувати з краю виробничої території з боку, протилежного житловому масиву. Розташування цехів повинно бути таким, щоб при напрямі вітрів у бік житлових кварталів їх викиди не об'єднувалися.

Важливе місце серед архітектурно-планувальних заходів посідають методи фітомеліорації з використанням зелених насаджень (заліснення і задерніння територій). Зелені насадження є незамінними біофільтрами.

1.1.4 Маловідходні та безвідходні технології

Упровадження безвідходних і маловідходних технологій є найбільш ефективним заходом, який дозволяє значно знизити рівень забруднення повітряного басейну урбанізованих територій і, загалом, збільшити показники якості життя населення.

Найбільш перспективними напрямками на сьогодні є такі:

а) перехід енергетики на нові види палива, заміна вугілля природним газом, що дозволяє суттєво знизити рівень забруднення атмосфери пилом та SO_2 ;

б) заміна автомобілів з бензиновими двигунами на автомобілі з двигунами, що працюють на зрідженому природному газі, поширення електротранспорту;

в) зниження енергоємності виробництва, економія та збереження енергоресурсів, використання вторинних енергоресурсів, вдосконалення топкового простору та паливних горілок енергетичних котлів, оптимізація процесів спалювання палива, що дозволяють скоротити викиди NO_x та CO в атмосферу.

1.1.5 Технічні засоби та технології очистки газів

Використання технічних засобів та технологій очистки газів на тепер є основним заходом із захисту та відновлення повітряного басейну урбанізованих територій.

Причиною цього є:

а) значна кількість напрацьованих технічних рішень щодо використання високоефективних апаратів очистки газів від твердих, рідких та основних газоподібних домішок;

б) низький рівень приведених витрат на очищення газів (на відміну від інших груп заходів), що дозволяє встановлювати апарати на основних джерелах забруднення атмосфери, досягати значного зниження рівня забруднення повітряного басейну в місті в короткі строки;

в) можливість повторного використання вловленого продукту;

г) обмежені розміри апаратів очистки дозволяють встановлювати їх на верхніх ярусах, на вільних ділянках діючих об'єктів без втручання в технологічний процес виробництва та порушення структури забудови території підприємств в прилеглих районів міста.

1.2 Класифікація систем пило- й газоочистки.

Ефективність апаратів очистки газів

1.2.1 Технології і способи очистки газів від аерозолів і газоподібних домішок

Класифікація технічних засобів і технологій очистки газів базується на способі очистки, що застосовується. Наприклад, для очистки від твердих та рідких часток застосовують такі методи:

а) сухої інерційної очистки;

б) мокрої очистки;

- в) фільтрації;
- г) електростатичного осадження.

Для очистки від газо- та пароподібних компонентів застосовують такі засоби:

- а) абсорбції;
- б) адсорбції;
- в) термічної очистки;
- г) каталітичної очистки;
- д) біохімічної очистки.

1.2.2 Показники ефективності очистки

Оцінка ефективності систем пило- й газоочистки проводиться за такими показниками:

- а) ступінь (ефективність) очистки газів;
- б) коефіцієнт проскоку;
- в) фракційний та парціальний ступені (коефіцієнти) очистки.

Ступінь очистки газів – це співвідношення кількості вловленої забруднюючої речовини до кількості забруднюючої речовини, що надходить в апарат на очищення:

$$\eta = \frac{M_{вл}}{M_{вх}} = \frac{M_{вх} - M_{вих}}{M_{вх}} = \frac{C_{вх} \cdot Q_{вх} - C_{вих} \cdot Q_{вих}}{C_{вх} \cdot Q_{вх}} = 1 - \frac{C_{вих} \cdot Q_{вих}}{C_{вх} \cdot Q_{вх}},$$

де $M_{вх}$, $M_{вих}$, $M_{вл}$ – кількість забруднюючої речовини, що, відповідно, входить до апарату очистки, виходить з нього та є вловленою, кг/с;

$C_{вх}$, $C_{вих}$ – концентрація забруднюючої речовини в одиниці об'єму сухого газу відповідно на вході та виході з нього, г/м³;

$Q_{вх}$, $Q_{вих}$ – витрата газу відповідно на вході та виході з апарату очистки, м³/с.

Ступінь очистки при роботі газоочисного апарату без витоків та підсмоктування повітря, визначений шляхом концентрації забруднюючої речовини відносно одиниці об'єму сухого газу, приведеного до нормальних умов, можна виразити такою формулою:

$$\eta = 1 - \frac{C_{вих}}{C_{вх}}$$

Коефіцієнт проскоку – це співвідношення кількості забруднюючої речовини, що виходить з викидами з апарату очистки, до кількості речовини, що надходить до нього:

$$K = \frac{M_{вих}}{M_{вх}} = 1 - \eta.$$

Значенням коефіцієнта проскоку користуються у випадках, коли необхідно оцінити кінцеву запиленість або порівняти відносну запиленість газів на виході з різних типів апаратів.

Коефіцієнт проскоку та ступінь очистки можуть бути виражені у частках одиниці або у відсотках.

Ступінь очистки для часток пилу різних діаметрів не є однаковою: краще вловлюється крупний пил, ніж дрібний. Ступінь досконалості пиловловлюючого апарату характеризується фракційним (або парціальним) ступенем очистки, що досягається за його допомогою.

Фракційний ступінь (коефіцієнт) очистки – це співвідношення кількості пилу фракції, вловленої в апараті, до кількості пилу, тієї самої фракції, що входить до апарату очистки.

Парціальний ступінь (коефіцієнт) очистки – це співвідношення кількості часток заданого розміру, вловлених в апараті, до кількості пилу й до кількості часток того самого розміру на вході в апарат.

Фракційний коефіцієнт очистки можна визначити як середнє значення парціальних коефіцієнтів очистки часток пилу, що входять до заданої фракції.

Графічне зображення фракційного та парціального ступеня очистки представлено на рисунку 1.2.

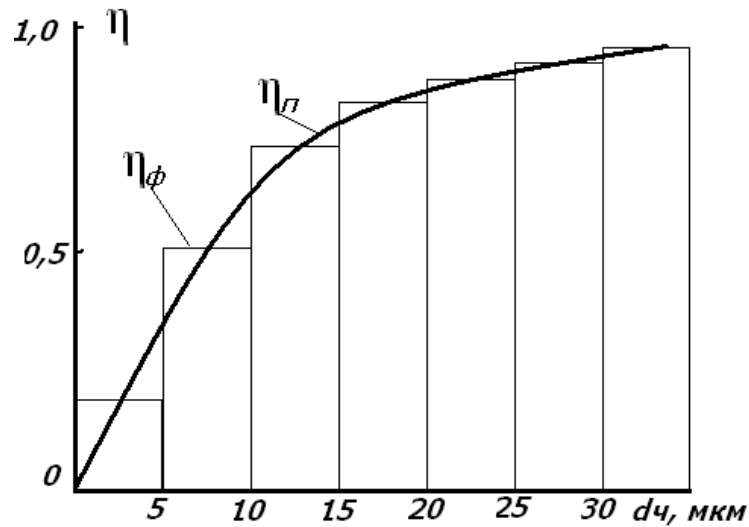


Рисунок 1.2 – Залежність фракційного та парціального ступенів очистки від розміру часток

Фракційний коефіцієнт очистки η_{ϕ} знаходять за формулою

$$\eta_{\phi} = \frac{M_{\phi вл}}{M_{\phi вх}} = \frac{\Phi_{\phi вл} \cdot M_{\phi вл}}{\Phi_{\phi вх} \cdot M_{\phi вх}} = \eta \frac{\Phi_{\phi вл}}{\Phi_{\phi вх}},$$

де $M_{\phi вл}$, $M_{\phi вх}$ – маса вловленої фракції та маса фракції на вході в апарат;

$\Phi_{\phi вл}$, $\Phi_{\phi вх}$ – вміст фракції в уловленій масі пилу та в масі пилу, що входить на очистку, %;

$M_{\phi вл}$, $M_{\phi вх}$ – маса вловленого пилу та маса пилу при вході на очистку.

Парціальний коефіцієнт очистки η_n знаходять за формулою

$$\eta_n = \frac{M_{N вл}}{M_{N вх}} = \frac{N_{\phi вл} \cdot M_{\phi вл}}{N_{\phi вх} \cdot M_{\phi вх}} = \eta \frac{N_{\phi вл}}{N_{\phi вх}},$$

де $M_{N вл}$, $M_{N вх}$ – маса часток заданого розміру, вловлених в апараті та на вході в апарат відповідно;

$N_{вл}$, $N_{вх}$ – кількість часток (%) заданого розміру, вловлених в апараті та на вході в апарат відповідно.

Знаючи дисперсний склад пилу та ступінь очистки за фракціями $\eta_{\phi i}$, можна визначити загальний ступінь очистки η таким чином:

$$\eta = \eta_{\phi 1} + \eta_{\phi 2} + \dots + \eta_{\phi n} \quad \text{або} \quad \eta = \sum \eta_{\phi} \frac{\Phi_{вх}}{100},$$

$$\eta = \sum \eta_n \frac{N_{вх}}{100} \Delta d_u,$$

де $\Phi_{вх}$ – вміст кожної з фракцій на вході в апарат;

$N_{вх}$ – кількість часток заданого діаметра на вході в апарат.

Остання формула може бути записана більш правильно таким чином:

$$\eta = \int_0^{\infty} \eta_n \frac{N_{вх}}{100} d(d_u).$$

Зазвичай графічна залежність $\eta_n = f(d_u)$, що побудована в імовірнісно-логарифмічній системі координат, набуває вигляду прямої лінії і може бути записана, як інтеграл ймовірності:

$$\eta_n = \int_{-\infty}^{\lg d_u / d_{50}} \frac{100}{\sqrt{2\pi} \cdot \lg \sigma_{\eta}} \times e^{-\frac{\lg^2 d_u / d_{50}}{\lg^2 \sigma_{\eta}}} d(\lg d_u / d_{50}),$$

де $\lg d_u / d_{50}$ – логарифм відношення поточного розміру d_u до діаметра часток d_{50} , що осаджуються з ефективністю 50 %;

$\lg \sigma_{\eta}$ – стандартне відхилення у функції розподілу парціальних коефіцієнтів очистки.

Значення d_{50} знаходять, як абсцису точки графіка $\eta_n = f(d_u)$ з ординатою, що дорівнює 50 %, а $\lg \sigma_{\eta}$ – зі співвідношення

$$\lg \sigma_{\eta} = \lg d_{84.1} - \lg d_{50},$$

де $\lg d_{84.1}$ – значення абсциси точки графіка $\eta_n = f(d_u)$ з ординатою $\eta_n = 84,1$ %.

Якщо розподіл часток, що підлягають очистці, є логарифімічно нормальним, то значення повного коефіцієнта очистки можна знайти за формулою

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dx = \frac{1}{2} [\Phi(x) + 1],$$

де показники x та t визначаються так:

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\epsilon}}; \quad t = \frac{\lg\left(\frac{d_\epsilon}{d_m}\right)}{\lg d_\epsilon}.$$

Сумарний ступінь очистки газів η_Σ , що досягається у декількох послідовних апаратах, визначають за формулою

$$\eta_\Sigma = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n),$$

де η_1, η_2, η_n – ступінь очистки газів, відповідно, у 1-му, 2-му, ... i -му пиловловлювачі.

При цьому необхідно враховувати зміну фракційного складу пилу під час переходу до кожного наступного апарата очистки.

2 МЕХАНІЧНА ОЧИСТКА ГАЗІВ

2.1 Фізичні основи гравітаційного й інерційного осадження пилу.

Гравітаційні й інерційні пиловловлювачі

Головною перевагою більшості апаратів гравітаційної та інерційної очистки є простота конструкції, що визначає можливість їх виготовлення на неспеціалізованих підприємствах.

Ступінь очистки газів в інерційних пиловловлювачах зазвичай є недостатньою, тому їх використовують, як перший ступінь очистки газів перед більш ефективними пиловловлювачами.

Осадження в полі сили тяжіння використовують для грубої очистки запилених газів від часток розміром 30–100 мкм, інерційне осадження – від часток діаметром 25–30 мкм, відцентрове осадження – від часток діаметром до 5 мкм.

2.1.1 Фізичні основи гравітаційного та інерційного осадження пилу

З моменту початку руху частки у в'язкому середовищі (водному або повітряному) виникає сила опору цьому руху F_c , яка, відповідно до закону Ньютона, виражається таким чином (Н):

$$F_c = C_x \cdot F_q \frac{\rho_g \cdot W_o^2}{2},$$

де W_o – відносна швидкість частки та середовища, м/с;

ρ_g – густина газу, кг/м³;

F_q – площа перетину частки, нормальна до напрямку руху;

C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору.

Для сферичних часток (як і для крапель рідини) коефіцієнт аеродинамічного опору є функцією від критерію Рейнольдса $C_x = f(Re)$.

Критерій Рейнольдса визначається за формулою

$$Re = \frac{w_0 d_r}{\nu_2} = \frac{w_0 d_4 \rho_2}{\mu_2}.$$

Для області ламінарного обтікання ($Re \leq 2$) $C_x = \frac{24}{Re}$.

З урахуванням наведених вище формул Re та C_x розрахункова формула для F_c набуває такого вигляду:

$$F_c = \frac{24 \cdot \mu_2}{w_0 \cdot d_4 \cdot \rho_4} \cdot \frac{\pi \cdot d_4^2}{4} \cdot \frac{\rho_2 \cdot w_0^2}{2} = 3 \cdot \pi \cdot d_4 \cdot \mu_2 \cdot w_0.$$

При осадженні частки на неї впливають сила тяжіння F_g та виштовхувальна сила F_a :

$$F_g = mg = \rho_4 V_4 g = \rho_4 \frac{\pi d_4^3}{6} g,$$

$$F_a = m_2 g = \rho_2 \frac{\pi d_4^3}{6} g.$$

Частка перебуває в рівновазі, якщо виконується така умова:

$$F_g - F_a - F = 0.$$

Поеднуючи розрахункові вирази для F_c , F_g та F_a , отримуємо таке співвідношення:

$$3\pi d_4 \mu_2 w_0 = (\rho_4 - \rho_2) \frac{\pi d_4^3}{6} g,$$

звідки отримуємо розрахункову формулу для визначення швидкості руху частки пилу:

$$w_0 = \frac{d_4^2 (\rho_4 - \rho_2) g}{18 \mu_2}.$$

Швидкість руху – це швидкість направлено вгору вертикального потоку газу, при якому задана частка буде утримуватися в положенні, що вона займає.

Розв'язавши рівняння w_0 відносно d_4 , отримаємо:

$$d_4 = \sqrt{\frac{18 \mu_2 w_0}{(\rho_4 - \rho_2) g}}.$$

Отриманий вираз показує, що при постійних густині ρ_2 та в'язкості газового середовища μ_2 кожній швидкості руху відповідає певний розмір частки.

2.1.2 Пилоосаджувальні камери

Пилоосаджувальні камери (ПК) становлять найпростіші установки для вловлювання крупних часток пилю.

ПК використовують як перший ступінь очистки газів для вловлювання найбільш крупних часток. Це дозволяє запобігти осадженню пилю в газоходах та зменшити навантаження на наступні ступені.

Варіанти принципових схем пилоосаджувальних камер наведені на рисунку 2.1.

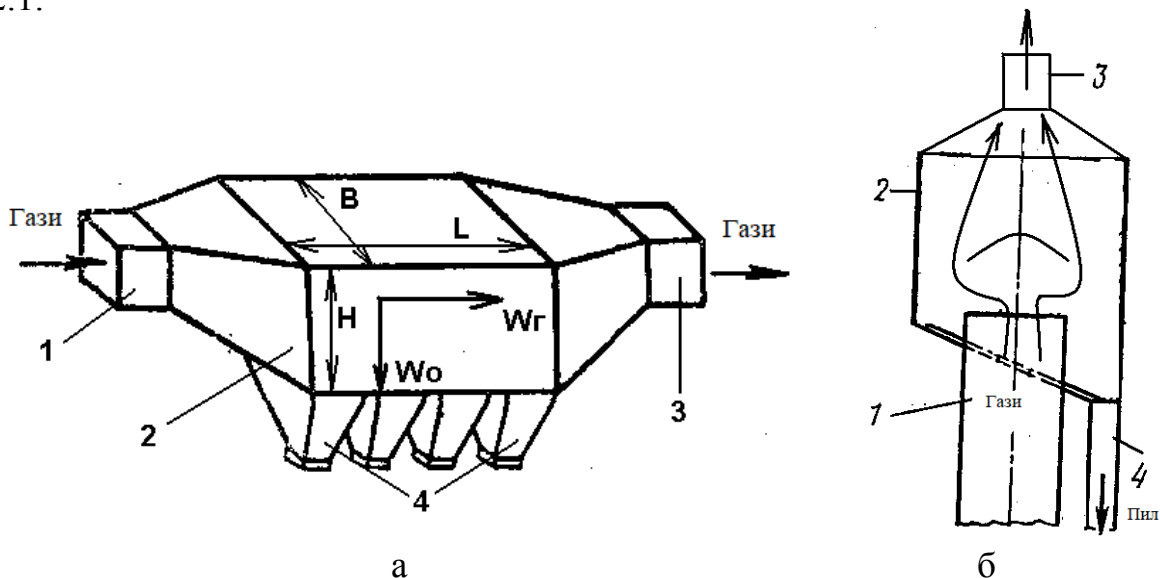


Рисунок 2.1 – Пилоосаджувальна камера:

а – горизонтальна ПК; б – вертикальна ПК;

1 – вхідний патрубок; 2 – корпус; 3 – вихідний патрубок;

4 – пиловивідний бункер

Максимально допустима швидкість газу в ПК задається виходячи з умови відсутності вторинного виносу пилю. Для різних видів пилю швидкість має значення від 1,7 м/с до 7,6 м/с та залежить від щільності, розміру та форми часток (табл. 2.1).

Ступінь очистки визначається часом перебування часток в ПК, що спричиняє необхідність збільшення розмірів ПК. При приблизному розрахунку осаджувальних камер приймають, що частки рухаються вздовж камери зі швидкістю, що дорівнює швидкості газového потоку W_r і одночасно опускаються донизу зі швидкістю, що дорівнює швидкості витання W_o . Для осадження частка повинна досягнути дна раніше, ніж газований потік винесе її з камери, тому час осадження частки, у крайньому випадку, повинен дорівнювати часу перебування її в камері.

Таблиця 2.1 – Максимально допустимі швидкості газів в ПК

Пил	Щільність часток, кг/м ³	Середньомедіальний розмір часток, мкм	Максимально допустима швидкість газів, м/с
Азбест	2 200	261	5,0
Вапняк	2 780	71	6,4
Крохмаль	1 270	64	1,75
Неметалевий пил з плавильних печей	3 020	117	5,6
Дерев'яна тирса	300	1 400	6,6

Час осадження частки визначається за формулою

$$\tau_o = \frac{H}{W_o}.$$

Час перебування частки в камері визначається за формулою

$$\tau_k = \frac{L}{W_z}.$$

Гранична умова осадження частки $\tau_o = \tau_k$, тому

$$\frac{H}{W_o} = \frac{L}{W_z} \Rightarrow HW_z = LW_o.$$

Витрата газу визначається за формулою

$$Q_z = FW_z = HBW_z.$$

Поєднуючи два останні вирази, отримуємо:

$$\frac{Q_z}{B} = LW_0 \Rightarrow Q_z = BLW_0,$$

$$Q_z = LB \frac{d_q^2 (\rho_q - \rho_z) g}{18\mu_z}.$$

У наведеній формулі можна визначити максимальну кількість газу, яку можна пропустити через камеру за умови осадження часток діаметром d_q . Вирішуючи зворотнє завдання, можна визначити діаметр часток, що будуть осаджуватися при пропусканні через камеру об'єму газу Q_r :

$$d = \sqrt{\frac{18\mu_z Q_r}{LB(\rho_q - \rho_z)g}}.$$

Розглядаючи формули розрахунку витрати газу та діаметра часток, можна зробити висновок, що зі збільшенням площі дна ПК значно поліпшуються умови осадження. Зменшення висоти камери не створює ефекту, оскільки при цьому зменшується поперечний переріз камери, зростає швидкість газу та зменшується час перебування частки в камері.

2.1.3 Жалюзійні пиловловлювачі

Жалюзійні пиловловлювачі (рис. 2.2) призначені для вловлювання крупнодисперсного пилу з діаметром часток 30–40 мкм. Вони використовуються для очистки промислових газів та як золовловлювачі.

За допомогою жалюзійної решітки, що встановлена в газоході та складається з ряду пластин, потік газу поділяється на дві частини. Більша частина газу (80–90 %) оминає пластини і частково, звільняючись від пилу, продовжує рухатись у первинному напрямі. Менша частина газу (10–20 %), збагачена пилом, відводиться для очистки в циклон, після чого приєднується до основного потоку газу.

Робота жалюзійних пиловловлювачів базується на інерційно-відбивному принципі. Частки пилу випадають з потоку при крутому повороті газу в

жалюзійній решітці внаслідок безпосереднього удару об пластину. В обох випадках частки потрапляють у меншу частину потоку, збагачуючи її пилом.

Ефективність вловлювання пилу η в жалюзійних пиловловлювачах залежить від ефективності решітки η_p , ефективності відсмоктувального пиловловлювача (циклону) η_u та частки φ газу, що відсмоктується у циклон, визначається за формулою

$$\eta = \eta_u [1 - (1 - \varphi)(1 - \eta_p)].$$

Для приблизних розрахунків можна використовувати такий вираз:

$$\eta = 0,8\eta_p.$$

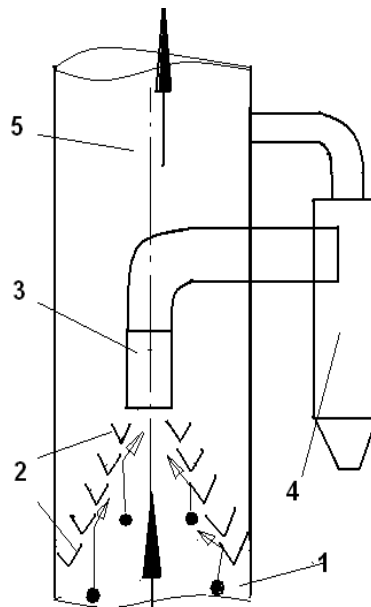


Рисунок 2.2 – Схема жалюзійного пиловловлювача:

1 – вхід запиленого газу; 2 – жалюзі (жалюзійна решітка; 3 – патрубок для відведення газу, збагаченого пилом; 4 – циклон; 5 – вихід очищеного газу

Жалюзійні пиловловлювачі (золотовловлювачі) характеризуються такими параметрами:

- гідравлічний опір 100–500 Па;
- кінцева запиленість (пошарове спалювання) 1–2 / (0,2–0,7)г/м²;
- кінцева запиленість (пилоподібне спалювання) 5–7 / (2–3) г/м².

2.1.4 Інерційні пиловловлювачі

Інерційні пиловловлювачі використовуються для грубої пилоочистки газів як першого ступеня очистки. Простіші пиловловлювачі інерційної дії наведені на рисунку 2.3.

Механізм осадження часток в інерційних пиловловлювачах базується на зміні напрямку їхнього руху. Зокрема, у пиловому мішку з центральним підведенням пилогазовий потік проходить вертикально вниз по циліндричному газоходу, потім змінює напрям руху на 180° і проходить через кільцевий зазор. Вловлений пил висипається в бункер. Ефект пиловловлювання значною мірою залежить від правильно підбраного кільцевого зазору.

Інерційні пиловловлювачі порівняно з простою пилоосаджувальною камерою мають більшу ефективність та менші габарити внаслідок додавання до ефекту гравітаційного осадження часток додаткового моменту руху донизу, що приблизно дорівнює $g/3$.

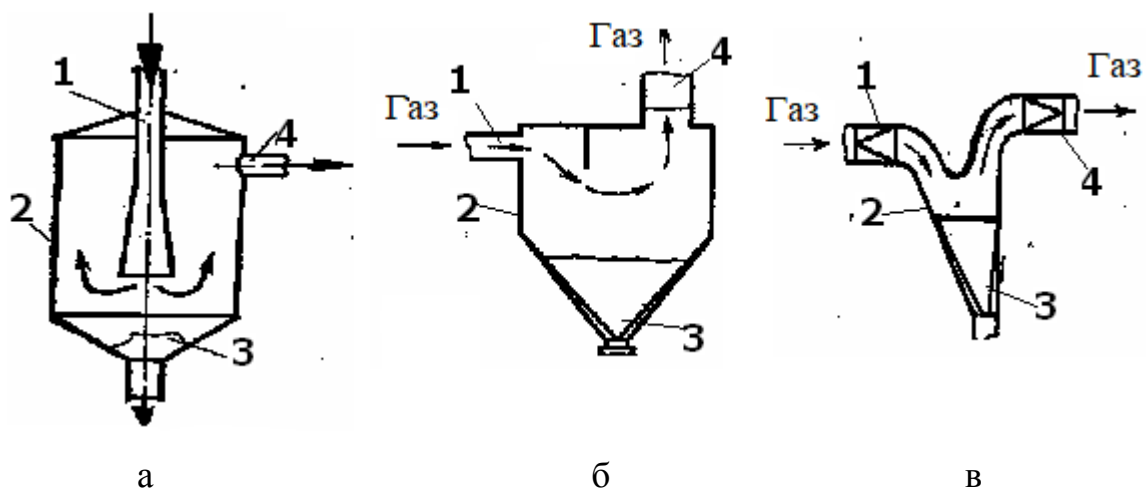


Рисунок 2.3 – Найпростіші інерційні пиловловлювачі:

а – пиловий мішок з центральним підведенням газу; б – пилоосаджувач із відбиваючою перетинкою; в – пилоосаджувач, що вбудовується в газохід;
1 – вхідний патрубок; 2 – корпус; 3 – бункер для збору пилу; 4 – вихідний патрубок

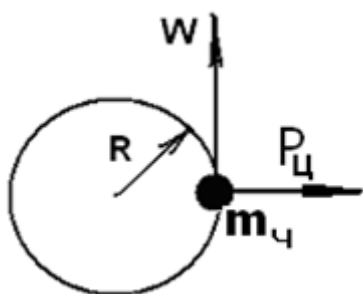
2.2 Основи теорії апаратів відцентрової дії.

Апарати відцентрової дії

2.2.1 Параметри ефективності відцентрового пиловловлення

Розглянемо частку пилу масою m_c , що обертається в газовому потоці циклону по колу радіусом R зі швидкістю W .

Під впливом відцентрової сили $P_{ц}$ частка отримує швидкість у радіальному напрямі, зустрічаючи на своєму шляху опір газового шару:



$$P_{ц} = \frac{m_c W^2}{R},$$

$$m_c = \frac{\pi d_c^3}{6} \rho_c \Rightarrow P_{ц} = \frac{\pi d_c^3}{6} \rho_c \frac{W^2}{R}.$$

Розглядаючи рух частки в радіальному напрямі в момент, коли сила опору врівноважує відцентрову силу, можна записати таку формулу:

$$\frac{\pi d_c^3}{6} \rho_c \frac{W^2}{R} = 3\pi d_c \mu_c w_0.$$

За цією формулою виразимо швидкість частки, яка може бути досягнута в радіальному напрямі:

$$w_0 = \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{18 \mu_c R}.$$

Швидкість переміщення частки в радіальному напрямі можна записати і в такому вигляді:

$$w_0 = \frac{dR}{dt}.$$

Об'єднавши два останні рівняння, отримаємо:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{18 \mu_c R}.$$

Розділивши змінні, отримаємо:

$$RdR = \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{18 \mu_c R} dt.$$

Проінтегруємо отримане рівняння в межах від R_1 до R_2 та від 0 до t , враховуючи, що $\int x dx = \frac{x^2}{2}$:

$$\frac{1}{2}(R_2^2 - R_1^2) = \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{18 \mu_c R} t \Rightarrow (R_2^2 - R_1^2) \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{9 \mu_c} t$$

Час проходження часткою шляху $R_2 - R_1$

$$t = \frac{9 \mu_c (R_2^2 - R_1^2)}{d_c^2 \rho_c W^2}.$$

Діаметр частки d_c , що встигає за час t пройти шлях довжиною $R_2 - R_1$:

$$d_c = \frac{\sqrt[3]{\mu_c (R_2^2 - R_1^2)}}{W \sqrt{\rho_c t}}.$$

З двох останніх формул зрозуміло, що ефективність роботи циклону зростає зі збільшенням швидкості газу W , розміру d_c і щільності часток ρ_c та зменшується зі збільшенням в'язкості газу та розмірів циклону.

Зважаючи на це, можна стверджувати, що параметри, які визначають ефективність роботи циклону, залежать від його конструктивних особливостей та властивостей пилогазових викидів. Наприклад, для циклону ЦН-15 параметри мають такі значення:

- оптимальна швидкість газу – 3,5 м/с;
- діаметр циклону – 0,6 м;
- щільність часток – 1 930 кг/м³;
- динамічна в'язкість газу – 22,2·10⁻⁶ Па·с;
- $d_{50} = 4,5$ мкм;

- стандартне відхилення у функції розподілу парціальних коефіцієнтів очистки $\lg\sigma_\eta = 0,352$;
- температура газів, що очищуються – до 400 °С;
- максимальний тиск (розрядження) – 2,5 КПа;
- максимальна концентрація пилу в газі, що очищується – до 400 г/м³;
- максимальний рекомендований діаметр – до 1 000 мм.

2.2.2 Циклони, батарейні циклони

Циклони є найбільш розповсюдженими пиловловлюючими апаратами. Вони призначені для вловлювання пилу розміром 15–20 мкм та більше.

Робота циклона базується на використанні відцентрових сил, що виникають при обертанні газового потоку всередині корпусу циклона. Таке обертання досягається внаслідок тангенційного введення газу в циклон або використання завихрювача. У результаті дії відцентрових сил завислі у потоці газу частки пилу відкидаються на стінки корпусу та випадають із потоку. Звільнений від пилу газ продовжує обертатися, виконує поворот на 180° та виходить із циклона через розташовану на осі вихлопну трубу (рис. 2.4).

Частки пилу, що досягають стінок корпусу під дією потоку, що обертається та переміщується в осьовому напрямі, рухаються до вихідного отвору корпусу та виводяться з циклона.

Найбільш поширеними є циклони конструкції ЦН (ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24). Також широкоживаними є циклони ЛЮТ та СЮТ. Циклони ЛЮТ порівняно з циклонами ЦН мають подовжену циліндричну частину, глибоко введену вихлопну трубу та мають великий кут розкриття конічної частини. Циклони СЮТ вирізняються повною відсутністю циліндричної частини та мають трикутну форму вхідного патрубку. Циклони ЦН, ЛЮТ, СЮТ є нормалізованими та будь-який їхній елемент конструкції може бути виражений у частках діаметра.

Основні конструктивні співвідношення циклонів залежать від типу обраного апарата.

Для циклона ЦН-15 рекомендуються такі співвідношення відносно внутрішнього діаметра корпусу циклона D :

- внутрішній діаметр вихлопної труби $d = 0,59D$;
- діаметр пиловипускного отвору $d_1 = 0,3-0,4D$;
- ширина вхідного патрубку $b = 0,2D$;
- висота вхідного патрубку $a = 0,66D$;
- кут нахилу кришки $\alpha = 15^\circ$;
- висота циліндричної частини $H = 2,26D$;
- висота конуса $H_k = 2D$;
- кут нахилу стінок бункера $\beta = 55-60^\circ$;
- діаметр бункера $D_b = 1,5D$;
- висота бункера $H_b = 0,8D$.

Відносно ефективності пиловловлювання циклони ЦН, ЛІОТ та СІОТ мало відрізняються один від одного.

Окрім циклонів зворотно-потокowego типу (до них належать всі розглянуті вище циклони), існують прямоточні циклони. Прямоточні циклони визначаються низьким гідравлічним опором, оскільки в них відсутній оберт газу на 180° . Однак вони є практично непридатними для вловлювання дрібнодисперсного пилю внаслідок низької ефективності.

На тепер розроблені прості за конструкцією циклонні елементи невеликого діаметра (100 мм, 150 мм, 250 мм) з високим ступенем очистки, які пристосовані для об'єднання у великі групи з високою пропускною здатністю – батарейні циклони.

Батарейний циклон (мультициклон) (рис. 2.6) становить пиловловлюючий апарат, що складається з великої кількості паралельно встановлених циклонних елементів (рис. 2.7). Циклонні елементи об'єднані в одному корпусі, що має загальне відведення газів та загальний бункер для збору пилю.

Для закручування газового потоку всередині циклонних елементів розташовані спеціальні пристрої, які становлять дволопатевий гвинт, або розетку, що складається з лопатей, встановлених під кутом до осі. Використання гвинта або розетки замість тангенційного патрубку для закручування потоку дозволяє досягти максимальної компактності та зручності компонування.

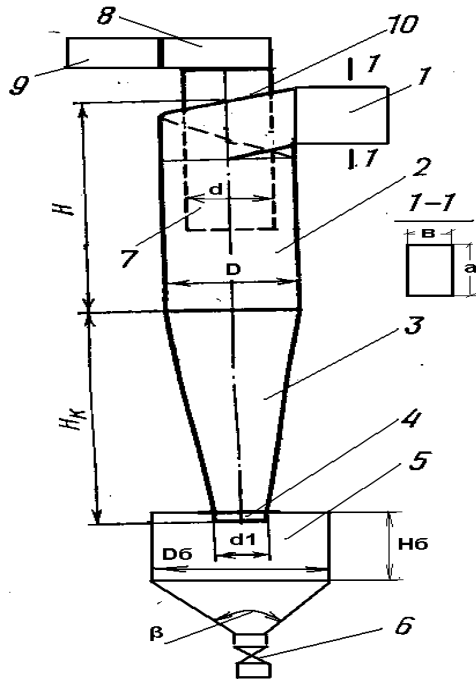


Рисунок 2.4 – Схема циклона:

- 1 – вхідний патрубок; 2 – циліндрична частина корпусу; 3 – конічна частина корпусу; 4 – пиловипускний отвір; 5 – бункер для пилу; 6 – пиловий затвор; 7 – вихлопна труба; 8 – розкручувальний равлик; 9 – вихідний патрубок; 10 – нахилена кришка

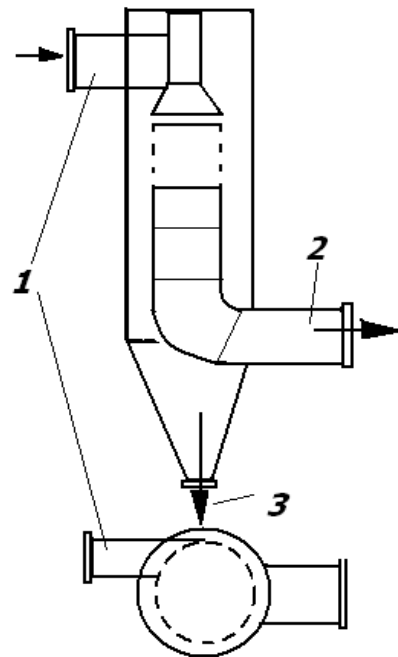


Рисунок 2.5 – Прямоточний циклон:

- 1 – тангенційний вхід запиленого газу; 2 – вихід очищеного газу; 3 – вивозка вловленої пилу

Газ, що очищується в батарейному циклоні через вхідний патрубок надходить у розподільну камеру, звідки він входить до кільцевих зазорів між

корпусами циклонних елементів та вихлопними трубами. У цих зазорах встановлені напрямні елементи – лопаті гвинта або лопаті розетки, що закручують потік газів. Уловлений пил через пиловивідні отвори надходить до загального бункера. Знепилений газ через вихідні труби надходить в камеру очищеного газу та викидається в атмосферу через вихідний патрубок.

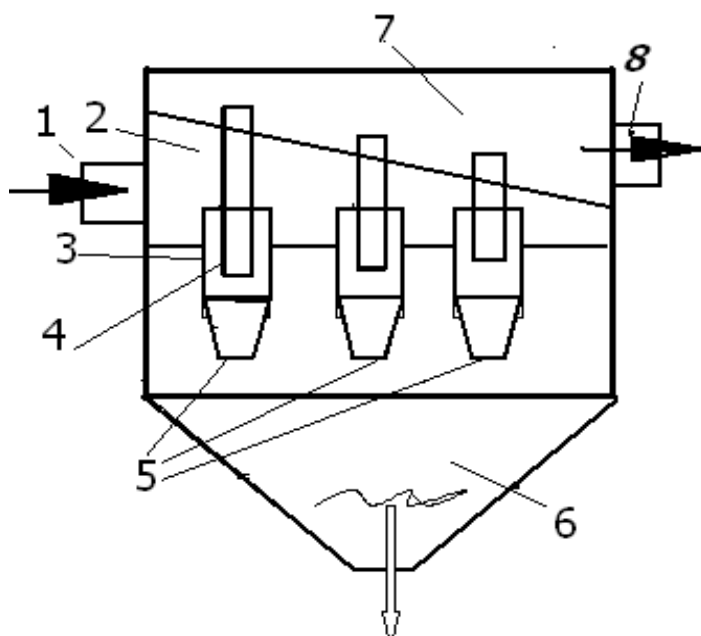


Рисунок 2.6 – Схема батарейного циклона:

1 – вхідний патрубок; 2 – газорозподільна камера; 3 – циклонний елемент (ЦЕ); 4 – вихлопна труба ЦЕ; 5 – пиловивідний отвір ЦЕ; 6 – бункер для пилу; 7 – камера очищеного газу; 8 – вихідний патрубок

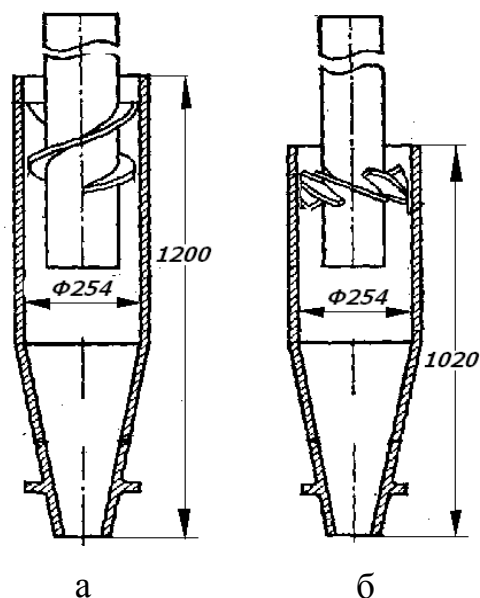


Рисунок 2.7 – Схема циклонних елементів:

а – циклонний елемент із напрямним апаратом типу «гвинт»; б – циклонний елемент з напрямним апаратом типу «розетка»

Значна кількість циклонних елементів, об'єднаних загальним пиловим бункером, підвищує вірогідність виникнення нерівномірності розподілу газів по циклонних елементах.

Досвід експлуатації батарейних циклонів доводить, що ефективність установки загалом на 20–25 % нижче, ніж ефективність окремих елементів, що обумовлено перетіканням газів між елементами з різним аеродинамічним опором. Для попередження перетоку використовують примусове відсмоктування газів з бункера, що дозволяє підвищити коефіцієнт очистки на 5–10 %. Гази, що відсмоктуються, очищують у циклоні та димососом подають до вхідної камери циклонних елементів, утворюючи таким чином контур рециркуляції.

2.2.3 Практичні рекомендації з вибору та розрахунку циклонів

Вибір типу та розміру циклона виконується, ґрунтуючись на визначеній витраті газів, фізико-хімічних властивостей пилу, необхідного ступеня очистки, габаритів установки, експлуатаційної надійності та вартості очистки.

Найбільш характерними порушеннями сталої роботи циклона є стирання стінок абразивним пилом та залипання. Зі збільшенням діаметра циклона та зниженням швидкості газового на вході стирання стінок та залипання зменшуються, тому для вловлювання абразивного пилу та пилу, що значно злипається, рекомендується використовувати циклони, здатні забезпечити необхідний ступінь очистки при порівняно невеликій швидкості пилогазового потоку на вході.

Розрахунок циклонів проводять за допомогою методу узагальнення та використання показників, які отримують під час випробування циклонів у промислових умовах.

Для розрахунку необхідно мати такі вихідні дані:

- кількість газу, що очищується (при робочих умовах) Q_2 , м³/с;
- щільність газу ρ_2 , кг/м³;
- динамічна в'язкість газу μ_2 , Па·с;

– дисперсний склад пилу, що задається двома параметрами d_m , мкм та $lg\sigma_u$;

– запиленість газу на вході в апарат C_{ex} , г/м³;

– щільність часток пилу ρ_u , кг/м³;

– необхідна ефективність очистки η .

Розрахунок виконують у такій послідовності:

1) задавшись типом циклону, за таблицями з довідкової літератури визначають оптимальну швидкість газу в апараті W_{opt} . Для більшості циклонів $W_{opt} = 2-4,5$ м/с. Для ЦН-15 $W_{opt} = 3,5$ м/с;

2) визначають площу перетину циклона за формулою

$$F = \frac{Q_e}{W_{opt}};$$

3) визначають діаметр циліндричної частини циклона за формулою

$$D^* = \sqrt{\frac{F}{0,785}}.$$

Діаметр циклона заокруглюють до розміру, що рекомендований прийнятим стандартним рядом діаметрів: $D = 200-1\ 000$ мм з кроком 100 мм;

4) розраховують дійсну швидкість газу в циклоні, яка не повинна відхилитись від оптимальної більш ніж на 15 %, за формулою

$$W_o = \frac{4Q_e}{\pi D^2};$$

5) визначають коефіцієнт гідравлічного опору за формулою

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{500} + K_3,$$

де ζ_{500} – коефіцієнт гідравлічного опору одиночного циклона з діаметром 500 мм (для циклона ЦН-15 $\zeta_{500} = 150-155$);

K_1 – поправочний коефіцієнт на діаметр циклона;

K_2 – поправочний коефіцієнт на запиленість газу;

K_3 – поправочний коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, пов'язані з компонованням циклонів у групи (для одиночного циклона $K_3 = 0$, для групового компоновання $K_3 = 35$).

Коефіцієнти ζ_{500} , K_1 , K_2 , K_3 визначаються за таблицями із довідкової літератури;

Таблиця 2.2 – Поправочний коефіцієнт на вплив діаметра циклона K_1

D, мм	Марка циклона		
	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 2.3 – Поправочний коефіцієнт на запиленість газів K_2 (D = 500 мм)

Марка циклона	Запиленість · 10 ³ , кг/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
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
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-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	–	–	–

б) визначають втрати тиску в циклоні за формулою

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho W_0^2}{2}.$$

Якщо визначені втрати тиску в циклоні будуть прийнятними, далі визначають повний коефіцієнт очистки в циклоні;

7) за довідковими таблицями визначають діаметр часток, що осаджуються з ефективністю 50 % d_{50cy} та стандартне відхилення у функції розподілу парціальних коефіцієнтів очистки $lg\sigma_{ncy}$ для стандартних умов.

Параметри ЦН-15: $d_{50cy} = 4,50$; $lg\sigma_{ncy} = 0,352$; $D_{cy} = 0,6m$; $W_{cy} = 3,5$ м/с;
 $\rho_{cy} = 1\ 930$ кг/м³; $\mu_{cy} = 2,22 \cdot 10^{-6}$ Па с;

8) знаходять d_{50} при робочих параметрах за формулою

$$d_{50} = d_{50cy} \sqrt{\left(\frac{D}{D_{cy}}\right) \left(\frac{\rho_{cy}}{\rho}\right) \left(\frac{\mu_2}{\mu_{2cy}}\right) \left(\frac{W_{cy}}{W}\right)};$$

9) визначають параметр X за формулою

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_v}};$$

10) визначають значення $\Phi(x)$ за довідковою таблицею та знаходять ступінь очистки η зі співвідношення

$$\eta = \frac{1}{2} [\Phi(x) + 1].$$

Після закінчення розрахунку отримане значення ступеня очистки η порівнюють із необхідним η_T . У випадку, коли $\eta < \eta_T$, необхідно обрати інший тип циклона з більшим коефіцієнтом гідравлічного опору.

Для орієнтовних розрахунків необхідного значення гідравлічного опору $\zeta_{цт}$ рекомендується така залежність:

$$\zeta_{цт} = \zeta_{цр} \left(\frac{1 - \eta_p}{1 - \eta_T}\right)^2 \frac{W_p D_p}{W_T D_T}.$$

Збільшення діаметра циклона призводить до зниження його ефективності, унаслідок чого циклони типу ЦН з діаметром більшим, ніж 1 000 мм використовувати не рекомендується. Це обмеження значно обмежує пропускну здатність газоочисних установок.

2.2.4 Радіальні пиловловлювачі

Пиловловлювачі ротаційної дії належать до апаратів грубої та напівтонкої очистки газів й ефективно вловлюють частки з розміром більше ніж 10 мкм.

Апарати вирізняються більшою компактністю внаслідок того, що вентилятор та сепаратор часток сполучаються в одному агрегаті.

Відцентрові пиловловлювачі ротаційної дії складаються з робочого колеса та кожуха (пилоприймача). Пилогазова суміш приводиться в обертальний рух робочим колесом. При цьому під дією розвивальних сил (відцентрової сили та сили Коріоліса) із газу, що очищується, виділяється пил. Частки потрапляють на периферію колеса і одночасно переміщуються вздовж ротора в пилоприймальний патрубок. Очищений газ виходить з пилоосаджувача через вихідний патрубок – патрубок чистого газу.

Серед динамічних апаратів найбільшого поширення набули димососи-пиловловлювачі (далі –ДП) для вловлювання часток із розміром більш ніж 15 мкм. ДП використовують для очистки газів малих котелень, у ливарному виробництві, на асфальтобетонних заводах для очищення газів від сушильних барабанів.

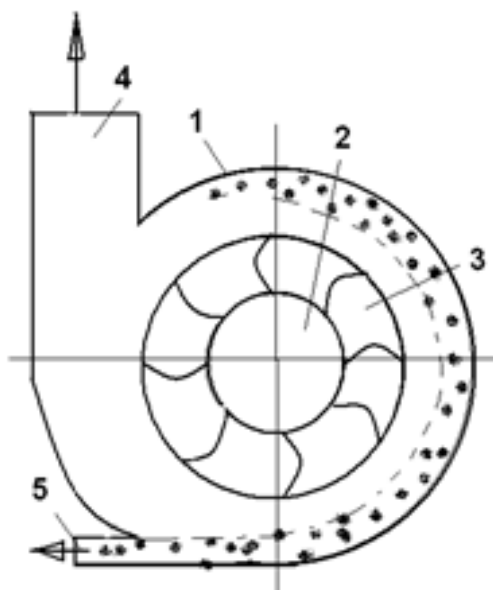


Рисунок 2.8 – Схема відцентрового пиловловлювача:

- 1 – спіралеподібний кожух; 2 – вхідний патрубок; 3 – робоче колесо;
- 4 – вихідний патрубок; 5 – пилоприймальний патрубок

3 ФІЛЬТРАЦІЯ

3.1 Фізичні основи очищення газів шляхом фільтрації

3.1.1 Характеристики поруватої перетинки

Робота поруватих фільтрів усіх видів базується на фільтрації запиленого газу через порувату перетинку. У процесі фільтрації частки пилу, завислі в газі, затримуються перетинкою, а газ безперешкодно проходить крізь неї. Як поруваті перетинки, можуть використовуватися тканина, папір, волокнуватий матеріал, кераміка, металева сітка, зернуватий шар.

До основних характеристик поруватої перетинки відносять:

1) поруватість (ε), що дорівнює відношенню порового простору (об'єму пор) між твердими непроникними елементами поруватого середовища до загального об'єму, який займає порувате середовище.

Поруватість є основною характеристикою поруватої перетинки і визначається за формулою

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{пор}}}{V} = \frac{V - V_M}{V} = \frac{M / \rho - M / \rho_M}{M / \rho} = \frac{l / \rho - l / \rho_M}{l / \rho} = \frac{(\rho - \rho_M) / (\rho \cdot \rho_M)}{1 / \rho} = \frac{\rho_M - \rho}{\rho_M},$$

де $V_{\text{пор}}$ – об'єм пор фільтруючого матеріалу (порового середовища);

V – об'єм фільтруючого матеріалу;

M – маса фільтруючого матеріалу;

ρ – удавана щільність фільтруючого матеріалу;

ρ_M – дійсна щільність фільтруючого матеріалу;

2) щільність упаковки (α) – це величина об'єму твердих елементів фільтруючої перетинки, укладена в одиниці об'єму поруватого середовища.

Щільність упаковки визначається за формулою

$$\alpha = \frac{V_M}{V} = 1 - \varepsilon.$$

Для описування процесу фільтрації скористаємось поняттям «ідеальний матеріал». В ідеальному матеріалі перетин капілярних каналів є циліндричним, канали паралельні між собою.

Розглянемо одиничний об'єм ідеального фільтруючого матеріалу (діаметр порового каналу дорівнює d_e , товщина матеріалу – l (рис. 3.1)).

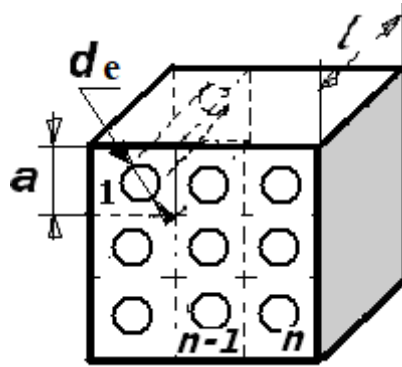


Рисунок 3.1 – Одиничний об'єм ідеального фільтруючого матеріалу

Розіб'ємо його на n елементарних ділянок зі стороною a . Поруватість фільтруючого матеріалу можна записати у такому вигляді:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{пор}}}{V} = \frac{\pi \cdot d_e^2 \cdot l \cdot n}{4} \Big/ a^2 \cdot l \cdot n = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4 \cdot a^2} = \frac{F_{\text{омс}}}{F} = f_o,$$

де f_o – відносний живий перетин порових каналів;

3) відносна поверхня порових каналів (S) – сумарна поверхня порових каналів в одиниці об'єму фільтруючого матеріалу:

$$S = \frac{\pi \cdot d_e^2 \cdot l \cdot n}{a^2 \cdot l \cdot n} = \frac{\pi \cdot d_e}{a^2}.$$

Виразимо значення ε , використовуючи отримане значення для S :

$$\varepsilon = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4 \cdot a^2} = \frac{\pi \cdot d_e}{a^2} \cdot \frac{d_e}{4} = S \frac{d_e}{4}.$$

Звідси виразимо d_e таким чином:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{S}.$$

Кількість порових каналів в одиниці об'єму

$$n = \frac{S}{S_1}, \quad \text{або} \quad n = \frac{V_m}{V_{m1}},$$

де S_1 – поверхня одного порового каналу;

V_m – об'єм фільтруючого матеріалу в одиниці об'єму фільтра;

V_{m1} – об'єм фільтруючого матеріалу в одній елементарній ділянці.

Звідси випливає, що

$$S = n S_1 = \frac{V_m}{V_{m1}} S_1.$$

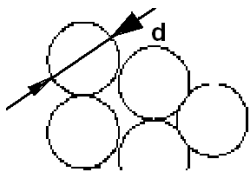
Враховуючи, що $\alpha = 1 - \varepsilon = \frac{V_m}{V_0} = V_m$, отримуємо $S = \frac{1 - \varepsilon}{V_{m1}} S_1$,

де V_0 – величина одиничного об'єму фільтруючого матеріалу.

З урахуванням цього отримуємо такий вираз для діаметра порового каналу:

$$d_e = \frac{4\varepsilon}{S} = \frac{4\varepsilon V_{m1}}{(1 - \varepsilon) S_1}.$$

Розглянемо фільтруючий матеріал, що складається з часток сферичної форми:



$$S_1 = \pi d^2 \quad V_{m1} = \frac{\pi d^3}{6};$$

Підставивши вирази V_{m1} та S_1 у формулу d_e , визначимо еквівалентний діаметр пор фільтруючого матеріалу, що складається з часток сферичної форми:

$$d_e = \frac{4\varepsilon \pi d^3}{6(1 - \varepsilon) \pi d^2} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon d}{(1 - \varepsilon)}.$$

З цього виразу випливає, що еквівалентний діаметр пор збільшується зі збільшенням діаметра сферичних часток;

4) швидкість фільтрації (w_ϕ) – це умовна швидкість, яка дорівнює відношенню об'ємної витрати газу, що проходить через фільтр, до повної площі фільтруючої перетинки:

$$w_\phi = \frac{Q_g}{F}.$$

Чисельно швидкість фільтрації дорівнює газовому навантаженню фільтра – об'єму газу, що проходить через одиницю поверхні фільтра за одиницю часу [$\text{м}^3/\text{м}^2\text{с}$].

Фактична швидкість газу в поровому каналі більша, ніж швидкість фільтрації і залежить від поруватості фільтруючої перетинки:

$$w = \frac{Q_g}{F_{\text{омв}}},$$

де $F_{\text{омв}}$ – сумарна площа отворів у фільтруючій перетинці.

З рівняння для визначення поруватості ε отримуємо, що $F_{\text{омв}} = f_o F$; $f_o = \varepsilon$. Підставивши цей вираз у формулу для розрахунку фактичної швидкості w , отримаємо такий вираз:

$$w = \frac{Q_g}{\varepsilon F} = \frac{w_\phi}{\varepsilon};$$

5) пилоємність – це кількість пилу, що затримується фільтром за період неперервної роботи (між двома регенераціями).

Критерієм пилоємності є інтенсивність зростання питомого опору U :

$$U = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{M_1},$$

де ΔP_1 та ΔP_2 – початковий та кінцевий опори фільтра, Па;

M_1 – питома запиленість фільтра (кількість пилу, вловленого одиницею поверхні), $\text{кг}/\text{м}^2$.

При вловлюванні дрібних часток пилоємність фільтра завжди є меншою, ніж при вловлюванні крупних часток.

3.1.2 Механізми процесу фільтрації

Осадження часток пилу на твердих елементах поруватої перетинки відбувається при їх зіткненні з елементами фільтруючого шару при русі часток в потоці газу. Механізм зіткнення часток пилу може бути різним. Ефективність дії різних механізмів осадження визначається коефіцієнтом захоплення.

Коефіцієнт захоплення (η_z) – це відношення площі перетину пилогазового потоку, що надходить ($F_{оч}$), із якого всі частки повністю осаджуються на фільтруючому елементі, до площі проєкції елемента (F_e) на площину, нормальну до напрямку руху потоку:

$$\eta_z = \frac{F_{оч}}{F_e}.$$

Здебільшого η_z визначають за формулами, що використовують як експериментальні, так і теоретичні дані.

Частки, завислі в газовому потоці, осаджуються в поруватому середовищі внаслідок наведених нижче ефектів (механізмів) (рис. 3.2):

1) механізм дотику.

У випадку, коли частка рухається по лінії, що проходить біля твердого елемента на відстані, що є меншою або дорівнює радіусу частки, вона обов'язково торкнеться цього елемента та утримається на ньому.

Визначальний параметр ефекту торкання

$$R = \frac{r}{r_0},$$

де r – радіус частки;

r_0 – радіус твердого елемента (волокна) фільтра.

Для поодинокого циліндра (волокна фільтра) коефіцієнт захоплення для потенційного обтікання ($Re > 500$) внаслідок торкання

$$\eta_R = (1 + R) - \frac{1}{1 + R},$$

де Re – число Рейнольдса, віднесене до радіуса циліндра, що обтікається;

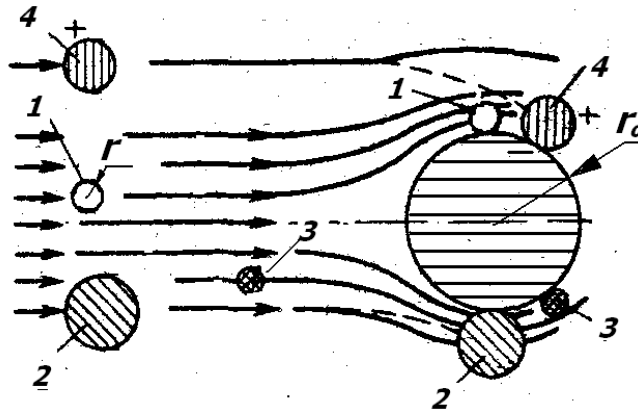


Рисунок 3.2 – Схема механізмів процесу фільтрації (механізм торкання)

2) інерційний механізм.

При обтіканні волокна фільтра лінія току викривлюється. Частка пилу, що зберігає прямолінійний рух внаслідок сили інерції, зміщується з лінії току та спрямовує свій рух до поверхні твердого елемента, осаджуючись на ньому.

Визначальний параметр інерційного осадження – це критерій Стокса, який характеризує відношення інерційної сили, що діє на частку, до сили опору середовища:

$$Stk = \frac{w d_p^2 \rho_p}{18 \mu d_0},$$

де d_p – діаметр частки;

w – швидкість обтікання перепони;

ρ_p – щільність пилу;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Н с/м²;

d_0 – визначальний діаметр твердого елемента фільтра.

Коефіцієнт захоплення за рахунок сил інерції для поодинокого циліндра (волокна) визначають за формулою

$$\eta_{Stk} = \frac{Stk^3}{Stk^3 + 1,54Stk^2 + 1,76}.$$

Для часток із діаметром понад 1 мкм інерційний механізм має вирішальне значення;

3) дифузійний механізм.

Унаслідок неврівноважених ударів молекул, що перебувають у броуновському русі, відбувається зміщення дрібних часток із ліній току та осадження їх на перепонах, що обтікаються (див. рис. 3.2). Дифузійний механізм переважає при осадженні часток діаметром менш ніж 0,5 мкм.

Коефіцієнт захоплення за рахунок дифузії для поодинокого циліндра визначається за формулою Ленгмюра:

$$\eta_d \approx 2,16 \left[\frac{l}{2(2 - \ln Re)} \right]^{1/3} Pe^{-2/3},$$

де Pe – критерій Пекле, що характеризує відносну роль конвекції та дифузії в осадженні частки на поверхні волокна:

$$Pe = \frac{2rw}{D},$$

де D – дифузійний параметр;

r – радіус частки;

4) гравітаційний механізм.

Захоплення часток може здійснюватися під дією сили тяжіння.

Коефіцієнт захоплення для поодинокого горизонтально розташованого впоперек потоку циліндра при вертикально спрямованому потоці газу можна знайти за таким виразом:

$$\eta_G = \frac{w_o}{w_z} = \frac{d_u^2 \cdot \rho_u \cdot g}{18 \cdot \mu_z} \cdot \frac{l}{w_z} \cdot \frac{w_z \cdot d_o}{w_z \cdot d_o} = \frac{d_u^2 \cdot \rho_u \cdot w_z}{18 \cdot \mu_z \cdot d_o} \cdot \frac{l}{\frac{w_z^2}{2g \cdot r_o}} = \frac{Stk}{Fr} = G,$$

де w_0 – швидкість падіння частки (витання), що встановилась;

$$w_0 = \frac{d_c^2 \rho_c g}{18\mu_c},$$

де w_c – швидкість газового потоку;

Fr – критерій Фруда, що характеризує співвідношення інерційних та гравітаційних сил:

$$Fr = \frac{w_c^2}{2gr_0};$$

де Stk – критерій Стокса, що характеризує співвідношення інерційних сил та сил опору середовища;

G – седиментаційний параметр.

При горизонтальному русі газу $\eta_G = G^2$.

Гравітаційний механізм починає відігравати істотну роль при низьких швидкостях фільтрації – менш ніж 0,05 см/с;

5) електростатичний механізм.

У випадку, коли волокно фільтра має електростатичний заряд або є поляризованим зовнішнім електричним полем, воно створює навколо себе нерівномірне електричне поле. Частки пилу поляризуються цим полем та притягуються до поверхні волокна (див. (4) на рис. 3.2).

Коефіцієнт електростатичного захоплення визначається за формулою

$$\eta_E = \frac{E_0^2 r^2}{6w\mu r_0},$$

де E_0 – напруженість електричного поля в поверхні волокна, н/Кл.

Сумарний коефіцієнт захоплення знаходимо за формулою

$$\eta_\Sigma = 1 - (1 - \eta_R)(1 - \eta_{Stk})(1 - \eta_D)(1 - \eta_E)(1 - \eta_G).$$

На практиці при визначенні η_Σ виокремлюють та враховують ті механізми захоплення, що вносять найбільший вклад у процес осадження часток. Впливом другорядних механізмів осадження у першому наближенні нехтують.

Фільтри з достатньою ефективністю можуть затримувати частки будь-якого діаметра. Залежно від типу фільтра та виду вловлюваного пилю частки можуть накопичуватися в усьому об'ємі фільтра або осаджуватися на чоловій поверхні перетинки, утворюючи фільтруючий пиловий шар.

Швидкість процесу фільтрації визначається перепадом тиску на поруватій перетинці. У міру накопичення на фільтрі часток пилю швидкість фільтрації поступово знижується. При досягненні граничного значення швидкості перетинку необхідно регенерувати – звільнити від вловленого пилю.

Зазвичай розміри порових каналів перевищують розміри вловлюваних часток. Вловлювання часток, що проходять углиб поруватого матеріалу, відбувається шляхом осадження їх на стінках каналів, де вони утримуються за допомогою адгезії. У випадку, коли розмір часток є більшим за розмір порових каналів, спостерігається ситовий ефект.

Більшість фільтрів працюють у режимі нестационарної фільтрації: унаслідок осадження пилю на фільтруючій перетинці змінюється її гідравлічний опір та ступінь очистки. Ця обставина значно ускладнює розрахунки та експлуатацію фільтрів.

3.1.3 Ступінь очищення в поруватому фільтрі

Загалом, ступінь очистки в поруватому фільтрі визначають у такій послідовності:

1) кількість фільтруючих елементів в одиниці об'єму поруватого матеріалу визначаємо за формулою

$$n = \frac{V_m}{V_{m1}} = \frac{V_m}{V} \frac{V}{V_{m1}} = \alpha \frac{V}{V_{m1}};$$

2) кількість часток (N^l_u), вловлених одним волокном за одиницю часу, знаходимо за рівнянням

$$N_u^1 = \eta_\Sigma F_1 W Z,$$

де F_1 – площа перетину одиничного фільтруючого волокна;

W – фактична швидкість газу в порах між фільтруючими елементами;

Z – визначувана концентрація – кількість часток, що містяться в одиниці об'єму.

Враховуючи, що $W = \frac{W_\phi}{\varepsilon} - \frac{W_\phi}{1-\alpha}$, отримуємо:

$$N_u^1 = \eta_\Sigma F_1 \frac{W_\phi}{1-\alpha} Z.$$

Кількість часток, вловлених одиницею об'єму фільтруючого матеріалу за одиницю часу,

$$N_u = \alpha \frac{V}{V_{m1}} \eta_\Sigma F_1 \frac{W_\phi}{1-\alpha} Z ;$$

3) зміну визначуваної концентрації часток за час $d\tau = dh/w_\phi$ можна записати у вигляді матеріального балансу часток пилу при проходженні поруватої перетинки через одиницю площі завтовшки dh :

$$-dzV = N_u d\tau = \alpha \frac{V}{V_{m1}} \eta_\Sigma F_1 Z \frac{W_\phi}{(1-\alpha) W_\phi} dh,$$

де h – шлях, який частка проходить за час τ :

$$h = w_\phi \tau;$$

4) скоротивши величини V та W_ϕ , отримуємо:

$$-dz = N_u d\tau = \alpha \frac{1}{V_{m1}} \eta_\Sigma F_1 Z \frac{1}{(1-\alpha)} dh.$$

Фізичний сенс цього рівняння зводиться до того, що зменшення часток у потоці газу, який проходить через фільтрувальний шар, дорівнює сумарній кількості часток, уловлених усіма фільтрувальними елементами цього шару;

5) розділимо змінні:

$$-\frac{dz}{z} = \frac{\alpha}{V_{m1}} \eta_\Sigma F_1 \frac{1}{(1-\alpha)} dh;$$

6) проінтегруємо за визначуваною концентрацією Z – від Z_0 до Z та за товщею поруватого матеріалу h – від 0 до H .

З урахуванням $\int_{Z_0}^Z \frac{dZ}{Z} = \ln Z - \ln Z_0$ отримуємо:

$$-\ln Z_0 + \ln Z = \ln \frac{Z}{Z_0} = -\frac{\alpha}{V_{m1}} \eta_{\Sigma} F_1 \frac{1}{(1-\alpha)} H;$$

7) пропотенціюємо отримане рівняння й отримаємо вираз для коефіцієнта проскоку:

$$\frac{Z}{Z_0} = \exp\left(-\frac{\alpha}{V_{m1}} \eta_{\Sigma} F_1 \frac{1}{(1-\alpha)} H\right);$$

8) отриманий вираз для K_{np} можна записати у такому вигляді:

$$K_{np} = \frac{Z}{Z_0} = e^{-\psi \eta_{\Sigma}},$$

$$\psi = \frac{\alpha F_1 H}{V_{m1}} \frac{1}{(1-\alpha)}.$$

При n шарах фільтру загальний проскок

$$K_o = K_1 K_2 K_3 \dots K_n = K^n;$$

9) загальний ступінь очистки може бути розрахований за формулою

$$\eta_o = 1 - K_o = 1 - (1 - \eta)^n.$$

Отримані вирази є наближеними, оскільки вони не враховують струменевий характер надходження газу з шару в шар, турбулізацію газового потоку у фільтрі та зміну фракційного складу пилу від шару до шару. Крім того, фільтруючий шар є сукупністю безладно розташованих фільтруючих елементів. Унаслідок цього поле швидкостей в реальному фільтрі значно відрізняється від поля швидкостей навколо ізольованого фільтруючого елемента.

Отже, наведені вище формули дають змогу приблизно проаналізувати ефективність фільтруючого елемента.

3.1.4 Гідравлічний опір поруватого фільтра

Як підтверджують теоретичні та експериментальні дослідження, у поруватих фільтрах у більшості випадків режим руху газів є ламінарним. Унаслідок цього для визначення гідравлічного опору поруватой перетинки можна використати закон Пуазейля:

$$\Delta P = \frac{8 \cdot \mu \cdot l \cdot w}{r_e^2},$$

де ΔP – втрата тиску у трубці – поровому каналі, Па;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, Па с;

l – довжина порового каналу, м;

w – швидкість газу в поровому каналі, м/с;

r_e – радіус порового каналу, м.

Згідно із законом Пуазейля (закон ламінарного току в'язкої рідини в тонкій циліндричній трубці), об'ємна витрата через поперечний переріз трубки $V = \pi r^4 \Delta P / 8 \mu l$. Водночас витрата, виражена через площу перетину й швидкість руху середовища W , $V = \pi r^2 W$.

З рівняння $\pi r^4 \Delta P / 8 \mu l = \pi r^2 W$ отримуємо формулу для визначення ΔP – гідравлічного опору у трубці.

Втрати тиску поруватого фільтра

$$\Delta P = \frac{8 \mu l w}{r_e^2}.$$

Запишемо формулу для визначення d_e – діаметра порового каналу – у такому вигляді:

$$d_e = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon d}{(1 - \varepsilon)} = \sigma \cdot d,$$

$$\sigma = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)}.$$

Сумарну еквівалентну довжину порового каналу l виразимо через товщину фільтрувального матеріалу H :

$$l = a^2 H,$$

де a – коефіцієнт звивистості пор, що враховує збільшення довжини каналу порівняно з товщиною шару та еквівалентну довжину місцевих опорів порового каналу.

Фактичну швидкість газу у поровому каналі виразимо через швидкість фільтрації:

$$W = \frac{W_\phi}{1 - \alpha}.$$

Підставивши в рівняння ΔP рівняння для розрахунку d_e та l , отримаємо:

$$\Delta P = \frac{8\mu a^2 H W_\phi}{(1 - \alpha)\sigma^2 r^2} = \frac{8a^2}{(1 - \alpha)\sigma^2} \cdot \frac{\mu W_\phi H}{r^2} = K \frac{\mu W_\phi H}{r^2},$$

де K – коефіцієнт опору поруватого середовища для кожного типу фільтра, що визначається за відповідними полуемпіричними формулами:

$$K = \frac{8a^2}{(1 - \alpha)\sigma^2}.$$

У загальному вигляді порувату перетинку можна представити як таку, що складається з двох шарів: перший шар – сама порувата перетинка з осадженими на стінках порового каналу частками пилу, другий шар – шар вловлених часток, що накопичуються на чоловій поверхні фільтра.

З часом опір обох шарів змінюється (збільшується): першого шару – у зв'язку зі зменшенням поруватості, другого шару – у зв'язку зі збільшенням товщини.

Загальну втрату тиску на фільтрі можна представити, як суму втрат тиску в кожному шарі:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = K^I \frac{\mu W_\phi H_1}{r_1^2} + K^{II} \frac{\mu W_\phi H_2}{r_2^2}.$$

Втрату тиску в першому шарі можна представити так:

$$\Delta P_1 = A \mu W_\phi,$$

де A – коефіцієнт, що залежить від геометричних та аеродинамічних характеристик фільтруючого шару й пилоємності первинного шару фільтра.

Втрату тиску в утвореному чоловому шарі пилу можна представити так:

$$\Delta P_2 = B M_2 \mu W_\phi,$$

де M_2 – маса пилу, що осів на 1 м^2 площі фільтра;

B – коефіцієнт, що залежить від поруватості, геометричних і аеродинамічних характеристик утворюваного вторинного шару пилу.

Загальна втрата тиску на фільтрі з урахуванням наведеного вище складатиме:

$$\Delta P = \mu W_\phi (A + B M_2).$$

Числові значення коефіцієнтів A і B визначають дослідним шляхом.

3.2 Застосування фільтрів у промисловості

3.2.1 Тканинні фільтри

У тканинних фільтрах використовують звичайні тканини, які отримують на ткацьких верстатах, та повсті (фетри), які отримують зволючуванням та механічним переплутуванням голкопробивним способом. Фільтри використовують для очистки від аерозолів відхідних газів плавильних печей у металургії, у скляній та керамічній промисловості, печей випалу, установок зі спалювання сміття, котельних установок.

Найбільш поширеним типом тканинного фільтра є рукавний фільтр. Корпус фільтра поділений на декілька камер (рис. 3.3), у кожній з яких розташовано декілька рукавів.

Запилений газ надходить у нижню частину камери через патрубков та підводиться всередину рукавів. Відфільтровуючись через тканину, газ збирається в камері корпусу при закритому клапані та при відкритому клапані

відводиться в колектор очищених газів. Частки пилю осаджуються на внутрішній поверхні рукавів. Їх опір при цьому поступово збільшується. Коли опір досягає певного граничного значення, фільтр переводиться в режим регенерації.

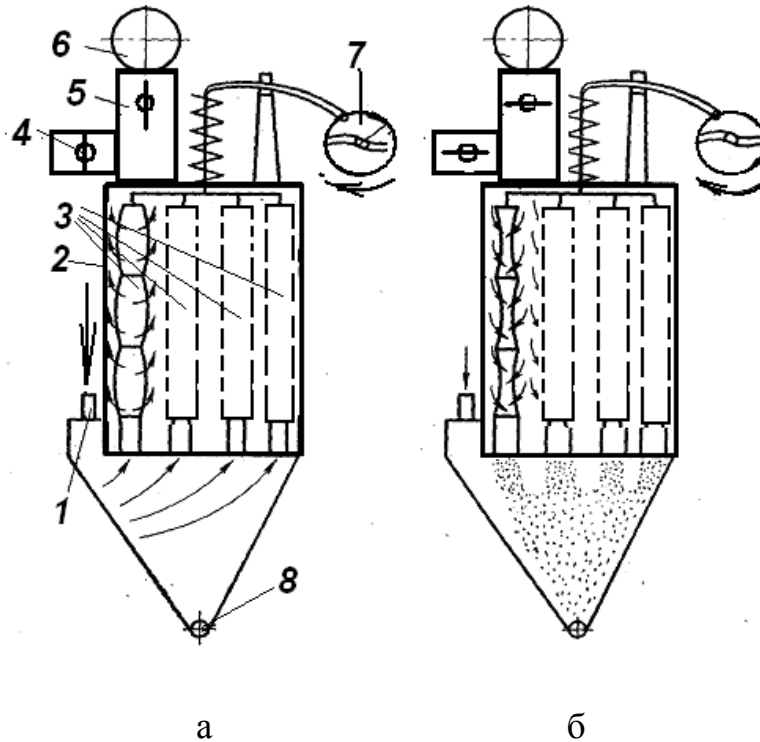


Рисунок 3.3 – Схема роботи рукавного фільтра:

а – фільтрація; б – регенерація;

- 1 – вхідний патрубок; 2 – корпус фільтра; 3 – рукави; 4 – клапан повітряного патрубка; 5 – клапан вихідного патрубка; 6 – колектор очищених газів;
7 – привід механізму струшування; 8 – пиловивантажувальний пристрій

Існують два основні способи регенерації: струшування фільтруючих елементів (механічне, аеродинамічне, акустичне); зворотне продування фільтруючих елементів повітрям.

При регенерації зворотним продуванням продувне повітря від спеціального вентилятора через патрубок при відкритому клапані надходить всередину камери корпусу (випускний клапан при цьому є закритим). Відфільтровуючись через рукав у зворотному напрямі, продувне повітря руйнує

шар пилу, що осів на поверхні рукава. Для підвищення ефективності регенерації рукави струшують за допомогою спеціального механізму струшування. Пил осипається в бункер через пиловивантажувальний пристрій. Відпрацьований продувний газ через вхідний патрубок надходить у газопровід брудного газу.

Камери фільтра переводять в режим регенерації по черзі. Відповідно, з n встановлених камер в роботі завжди перебуває $n-1$ камера.

У початковий період роботи фільтра пил осаджується на волокнах тканини. Далі на чоловій поверхні фільтра формується суцільний вторинний шар із часток, що не можуть проходити всередину тканини. Шар стає головним фільтруючим середовищем. Пори між частками чолового шару та самі частки мають майже однакові розміри, тому головну роль у процесі очистки починає відігравати «ситовий ефект». Непроникність вторинного пилового шару для часток пояснює високий ступінь очистки газів у тканинних фільтрах.

Класифікують тканинні фільтри за такими ознаками:

- за видом використаної тканини;
- за способом регенерації;
- за кількістю секцій в установці (однокамерні та багатоканерні);
- за формою корпусу;
- за місцем розташування вентилятора (всмоктування, нагнітання);
- за формою фільтруючих елементів (рукавні, плоскі).

Найбільш використовуваними фільтрувальними тканинами є бавовняні, вовняні, нітроніві, лавсанові, склотканини, неткані матеріали (фетри, повсть).

Найбільше поширення у промисловості набули рукавні фільтри з такими параметрами:

- діаметр рукава – 135–220 мм;
- довжина рукава – 2,4–3,4 м;
- максимальний ступінь очистки – 99,9 %;
- оптимальна швидкість фільтрації – 0,5–1 м/с;
- аеродинамічний опір – 750–1 500 Па.

Гідравлічний опір рукавних фільтрів розраховують за формулою

$$\Delta P = \mu W_{\phi} (A + B M_2),$$

де A, B – емпіричні коефіцієнти.

Кількість пилу, накопиченого на одиниці площі фільтра за час t ,

$$M_2 = Z_1 W_{\phi} t.$$

Необхідну тривалість періоду між двома регенераціями t визначають шляхом розв'язання двох наведених вище рівнянь, а саме:

$$t = \frac{\frac{\Delta P}{\mu W_{\phi}} - A}{B Z_1 W_{\phi}}.$$

Кількість газу, що проходить через тканину, знаходимо за формулою

$$V_2 = V_2^1 + f W_{np},$$

де V_2^1 – об'ємна витрата газу, що підводиться до фільтра;

W_{np} – швидкість повітря при зворотній продувці, м/с;

f – поверхня рукавів, розташованих в одній секції, м².

Необхідна поверхня рукавів усіх секцій

$$F = \frac{V_2}{W_{\phi}} + f.$$

Необхідна кількість секцій

$$n = \frac{F}{f}.$$

3.2.2 Волокнуваті фільтри

Волокнуваті фільтри (набивні, мати, з картону, паперу тощо) становлять поруваті перетинки (шари різної товщини), що складаються з неупорядковано розташованих волокон (рис. 3.4). Це фільтри об'ємної дії, оскільки вони призначені для вловлювання та накопичення часток за всією їхньою глибиною.

Волокнуваті фільтри призначені для очистки від пилу слабо запылених потоків повітря з концентрацією пилу не більш ніж 5 мг/м^3 у системах припливної вентиляції та кондиціонування повітря.

У зв'язку з високою поруватістю ($\varepsilon \leq 0,1$) аерозольні частки легко проходять всередину матеріалу, тому регенерація відпрацьованих фільтрів ускладнена та нерентабельна. Після закінчення терміну використання відпрацьоване фільтруюче середовище зазвичай змінюють на нове.

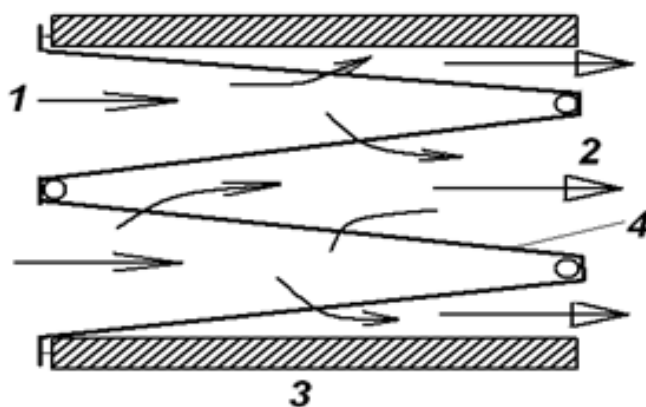


Рисунок 3.4 – Схема секції волокнуватого фільтра:

1 – вхід газу; 2 – вихід газу; 3 – бокова стінка; 4 – фільтруючий матеріал

Основні характеристики волокнуватих фільтрів:

- швидкість фільтрації – $0,01\text{--}0,1 \text{ м/с}$;
- гідравлічний опір (чистий фільтр) – $200\text{--}300 \text{ Па}$;
- гідравлічний опір (забитий пилом фільтр) – $700\text{--}1\ 500 \text{ Па}$;
- ступінь очистки для дрібнодисперсних часток – $\geq 99 \%$;
- питома поверхня фільтрації – $100\text{--}150 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

3.2.3 Зернуваті фільтри

У зернуватому фільтрі фільтруючий шар складається із зерен різної форми (сфери, кільця, гранули, шматки тощо). Фільтруючим матеріалом зернуватого фільтра можуть бути пісок, щебінь, шлак, подрібнена гірська порода, тирса,

крихти гуми, графіту, пластмаси, стандартні види насадок (кільця Рашига, сідла Берля, сфери тощо).

Переваги зернуватих фільтрів:

- низька вартість, доступність матеріалів, можливість використання для очистки високотемпературних газів (до 500–800 °С) в умовах агресивного середовища за різких змін тиску та температури;

- можливість використання для вловлювання пилу, що злипається, високоомного, абразивного в умовах, коли ускладнене використання апаратів інших типів;

- можливість повернення в технологічний процес вловленого у фільтрі продукту (наприклад, фільтруючий шар складається із зерен шихти сировини та вловленого пилу).

Зернуватий шар може бути використаний, як:

- фільтруюча перетинка для очистки газів від твердих часток;
- каталізатор або сорбент при каталітичній та сорбційній очистці.

Вирізняють такі типи зернуватих фільтрів:

- зернуваті насадкові (насіпні) фільтри, у яких вловлювальні елементи жорстко не пов'язані між собою. До них відносять статистичні (нерухомі) пошарові фільтри, динамічні (рухомі) пошарові фільтри з гравітаційним переміщенням сипкого середовища, псевдоскраплені шари;

- жорсткі поруваті фільтри, у яких зерна міцно поєднані один з одним за допомогою спікання, пресування, склеювання (порувата кераміка, поруваті метали, поруваті пластмаси).

На сьогодні зернуваті фільтри не є поширеними внаслідок складності їхньої експлуатації.

Залежно від виду вловлюваного пилу зернуваті фільтри можуть мати такі параметри:

- ступінь очистки – 95–99,5 %;
- гідравлічний опір – 1 300–3 000 Па;

– швидкість фільтрації – 15–35 м/хв.

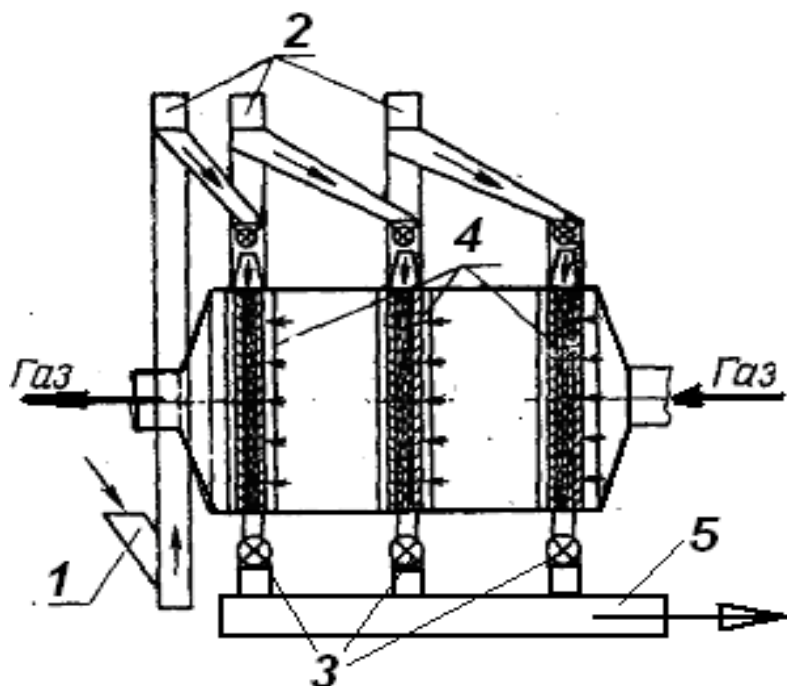


Рисунок 3.5 – Фільтр із рухомими шарами із зернуватого матеріалу:
1 – короб для подавання свіжого зернуватого матеріалу; 2 – живильники;
3 – затвори; 4 – фільтруючі шари; 5 – короб для відведення запиленого матеріалу

4 ЕЛЕКТРИЧНЕ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

4.1 Фізичні основи електричного очищення газів

4.1.1 Стадії електричного очищення

Процес електроочистки можна поділити на такі стадії:

- зарядження часток, завислих у газі;
- рух заряджених часток до електродів;
- осадження часток на електродах;
- видалення осаджених часток з електроду.

Основою процесу електроочистки є утворення між електродами електрофільтра коронного розряду, що є характерним для системи електродів із різким неоднорідним полем.

Схема процесу електричної фільтрації газів наведена на рисунку 4.1.

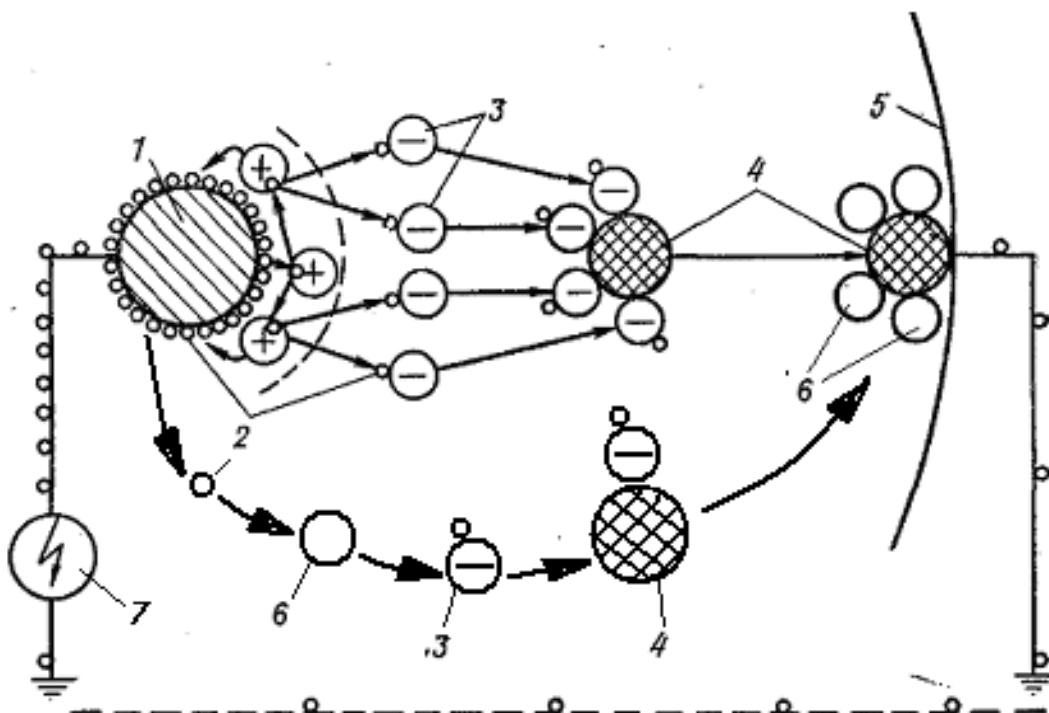


Рисунок 4.1 – Механізм зарядження й осадження часток в електрофільтрі:

- 1 – коронуючий електрод; 2 – електрони; 3 – іони; 4 – частки пилу;
5 – осаджувальний електрод; 6 – молекули газу; 7 – агрегат електроживлення

Газ, що містить завислі частки, проходить через систему і осаджувальних (заземлених) та коронуючих електродів, до яких підведений електричний струм високої напруги.

При достатньо високій напрузі, що прикладена до міжелектродного простору, у поверхні коронуючого електрода відбувається ударна іонізація газу, що супроводжується виникненням коронного розряду – корони. Корона не поширюється на весь міжелектродний проміжок та затухає зі зменшенням напруженості електричного поля в напрямі осаджувального електрода.

Газові іони різної полярності, що утворюються в зоні корони, під дією сил електричного поля рухаються до різнойменних електродів. Унаслідок цього в міжелектродному проміжку виникає електричний струм, що називається «струмом корони». Вловлювані частки адсорбують на своїй поверхні іони, отримуючи при цьому електричний заряд. Під впливом сил електричного поля частки рухаються до електродів та осаджуються на них. Більша частина часток осаджується на розвиненій поверхні осаджувальних електродів. По мірі накопичення на електродах осаджені частки видаляються шляхом струшування або промивання електродів водою.

4.1.2 Критична напруга коронного розряду

Коронний розряд виникає при досягненні певної напруженості електричного поля, що називається початковою або критичною напругою. Наприклад, критична напруга для повітря при атмосферному тиску та температурі 20 °С становить близько 15 кВ/см.

Зі збільшенням напруги на електродах понад критичну відповідно збільшується струм корони, інтенсифікуються процеси зарядження та осадження часток, тобто зростає ефективність їх вловлювання.

При досягненні певного значення напруги на електродах електрична міцність газового проміжку порушується іскровим або дуговим електричним розрядом виникає пробій міжелектродного проміжку.

Критична напруга коронного розряду для системи, що складається з трубчастого осаджувального електрода та гладкого дротяного коронуючого електрода, визначається за формулою

$$U_0 = E_0 R_1 \ln \frac{R_2}{R_1},$$

де E_0 – критична напруженість електричного поля, В/м;

R_1 – радіус коронуючого електрода, м;

R_2 – радіус трубчастого осаджувального електрода, м.

З наведеної формули U_0 випливає, що зі зменшенням радіуса коронуючого електрода R_1 критична напруга знижується, тобто відбувається більш раннє запалення корони. У промислових електрофільтрах при зазвичай використовуваних значеннях $R_1 = 0,001\text{--}0,002$ м та $R_2 = 0,1\text{--}0,15$ м значення критичної напруги перебувають у межах 20–40 кВ.

4.1.3 Вольт-амперна характеристика

Роботу електрофільтра оцінюють за вольт-амперною характеристикою.

Вольт-амперна характеристика електрофільтра – це залежність між прикладеною до електродів напругою та силою струму корони.

Вигляд вольт-амперних характеристик залежить від багатьох факторів, зокрема від:

- полярності прикладеної до електродів різниці потенціалів;
- конструктивних параметрів (геометричні характеристики електродів);
- технологічних параметрів газу;
- кількості завислих часток, що містяться в газі, та їх властивостей.

Приклади вольт-амперних характеристик електрофільтрів наведені на рисунку 4.2.

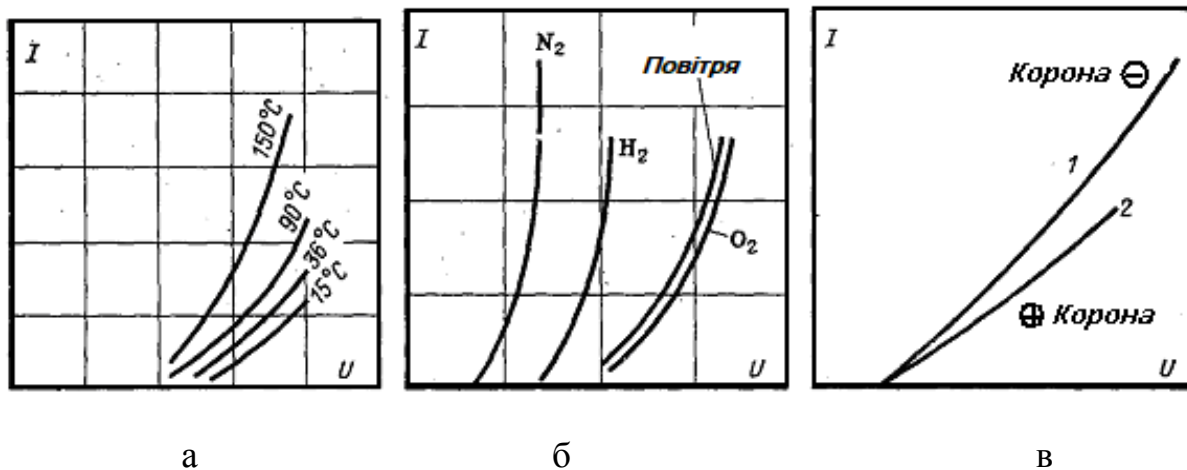


Рисунок 4.2 – Різновид залежності вольт-амперних характеристик електрофільтрів:

а – від температури; б – від складу газу; в – від полярності корони

Для електричної очистки газів зазвичай використовується негативна корона, тобто на коронуючий електрод подається негативна напруга випрямленого струму. Це пояснюється більшою рухливістю негативних іонів порівняно з позитивними. Крім того, при негативній короні вдається підтримувати більш високу напругу без іскрового пробою між електродами.

4.2 Електрофільтри

Електрофільтри широко використовуються для очистки промислових газів від твердих та рідких забруднюючих речовин майже у всіх галузях, зокрема теплоенергетиці, чорній та кольоровій металургії, хімії та нафтохімії, будівництві, виробництві добрив та утилізації промислових відходів, атомній енергетиці тощо.

Переваги електрофільтрів:

- високий ступінь очистки, що сягає 99 %;
- невисокий газодинамічний опір апарату – 150–200 Па;

- низькі енергетичні витрати на вловлювання часток – 0,3–1,8 МДж (0,1–0,5 кВт·год) на 1 000 м³ газу;
- можливість вловлювання часток широкого діапазону з розміром 0,1–100 мкм та менше;
- можливість очистки газів із високою початковою запиленістю (до 50 г/м³);
- можливість очистки газів з високою температурою (до 500 °С);
- можливість роботи апаратів під тиском, під розрідженням, а також в умовах впливу різних агресивних середовищ;
- висока продуктивність (до 1 млн м³/год та більше);
- можливість повної автоматизації процесу.

До недоліків електрофільтрів належить:

- висока чутливість процесу фільтрації до відхилень від заданих параметрів технологічного режиму;
- висока чутливість до незначних механічних дефектів в активній зоні апарату;
- неможливість використання для очистки вибухо- та пожежонебезпечних середовищ;
- значні розміри та висока вартість апаратів;
- високі вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу.

4.2.1 Конструкції електрофільтрів

Установка для електричного очищення газів складається з електрофільтра, агрегатів живлення та систем транспортування вловленої пилу.

Електрофільтр складається з металевого корпусу з розташованими всередині нього осаджувальними та коронуючими електродами. На вході в електрофільтр зазвичай встановлюється газорозподільний пристрій, що забезпечує рівномірний розподіл газів в активній зоні апарату. В нижній частині

корпусу електрофільтра встановлюються спеціальні пристрої для збору пилю – бункери для його видалення (рис. 4.3).

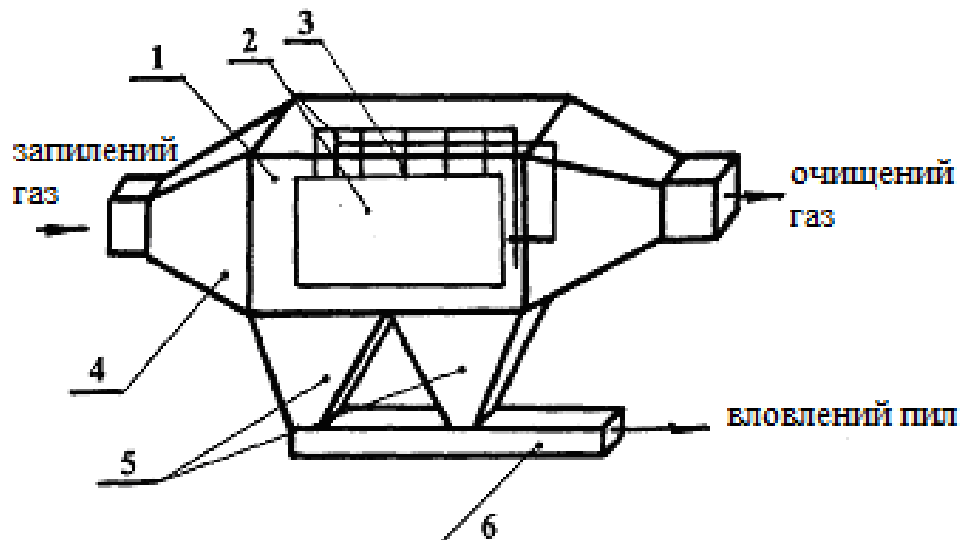


Рисунок 4.3 – Електрофільтр:

1 – корпус; 2 – осаджувальні електроди; 3 – коронуючі електроди;
4 – газорозподільний пристрій; 5 – бункери для збору пилю; 6 – система транспортування пилю

Електрофільтри можна класифікувати за такими ознаками:

1) за розташуванням зон зарядження та осадження:

– однозонні – зарядження та осадження часток здійснюється в одній зоні (використовуються для очистки промислових газів);

– двозонні – зарядження та осадження часток відбувається окремо в іонізаторі та осаджувачі (використовуються в системах тонкої очистки повітря в системах вентиляції та кондиціонування);

2) за способом видалення часток, осаджених на електродах:

– сухі електрофільтри. У сухих електрофільтрах тверді частки видаляються з електродів за допомогою струшування. Струшування осаджувальних електродів може виконуватися декількома способами: співударяння, ударно-молоткове струшування, використання ударно-імпульсних систем і вібраційних механізмів. Головний недолік методу

струшування – пришвидшене втомлене зношування конструкцій електрофільтра. Очищений газ у сухих електрофільтрах повинен мати температуру, що перевищує точку роси, для уникнення конденсації вологи. Поява вологи сприяє виникненню відкладень, що важко видаляються, та корозії апарату;

– мокрі електрофільтри. У мокрих електрофільтрах вловлені частки змивають з електродів водою. Періодичне промивання передбачає короткочасне подавання великої кількості рідини для промивання в активну зону при одночасному відімкненні електрофільтра від живлення. Безперервне промивання здійснюється шляхом безперервного подавання рідини для промивання на працюючі електроди. Кількість рідини при цьому дорівнює мінімально необхідній для утворення суцільної водяної плівки для змивання осаджуваного пилу. Температура газів, що надходять до мокрого електрофільтра, повинна бути близькою до точки роси. Апарати можуть використовуватися для вловлювання туману або крапельної вологи з газового потоку;

3) за напрямом руху газу в електрофільтрі:

- вертикальні;
- горизонтальні;

4) за кількістю послідовно встановлених полів:

- однопольові;
- багатопольові.

Найбільш поширеним типом електрофільтра є багатопольовий горизонтальний фільтр. Наявність декількох, послідовно встановлених полів поліпшує умови вловлювання часток внаслідок можливості диференціації електричного режиму та забезпечення можливості почергового струшування за полями.

Електроди – коронуючі та осаджувальні – є основним технологічним елементом, що вирішальним чином впливає на роботу електрофільтра.

Системи осаджувальних електродів виконують двох типів:

- із пластинчастими електродами;
- із трубчастими електродами.

Осаджувальні електроди повинні мати гладку поверхню (без гострих кутів) та порожнини, що дозволяють струшувати пил, який осів на них, та створювати підвищену напруженість поля. За наявності гострих кутів та крайок робоча напруга електрофільтра значно зменшується.

Конструкція електроду та високі електричні показники повинні забезпечувати мінімальний вторинний винос та мати достатню механічну міцність. Це необхідно для надійної роботи апарата в умовах підвищених температур та сильних вібрацій. Один з основних недоліків плоских електродів – різке підвищення вторинного виносу при збільшенні швидкості більш ніж 1 м/с, тому плоскі осаджувальні електроди в сухих електрофільтрах використовують при швидкості газу не більш ніж 0,6–0,8 м/с.

Пластинчасті електроди можуть бути листовими, прутковими, перфорованими, із профільованих елементів (рис. 4.4).

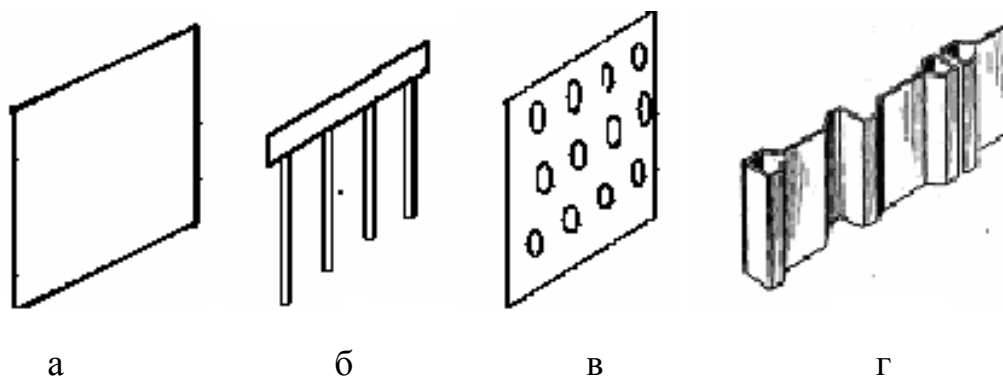


Рисунок 4.4 – Пластинчасті електроди:

а – лист; б – пруток; в – перфорований лист; г – профіль

Трубчасті електроди можуть бути виготовлені зі спеціальних труб із круглим перерізом або шестигранними стільниковими (рис. 4.5).

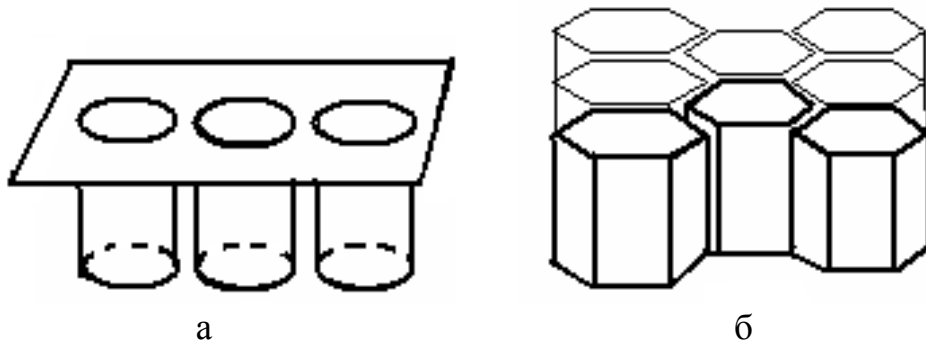


Рисунок 4.5 – Види трубчастих електродів:
а – труба; б – шестигранний стільниковий

Коронуючі електроди можуть бути рамковими, вільно підвішеними, жорсткими та нежорсткими, з нефіксованими (гладкі) та з фіксованими точками розряду (рис. 4.6).

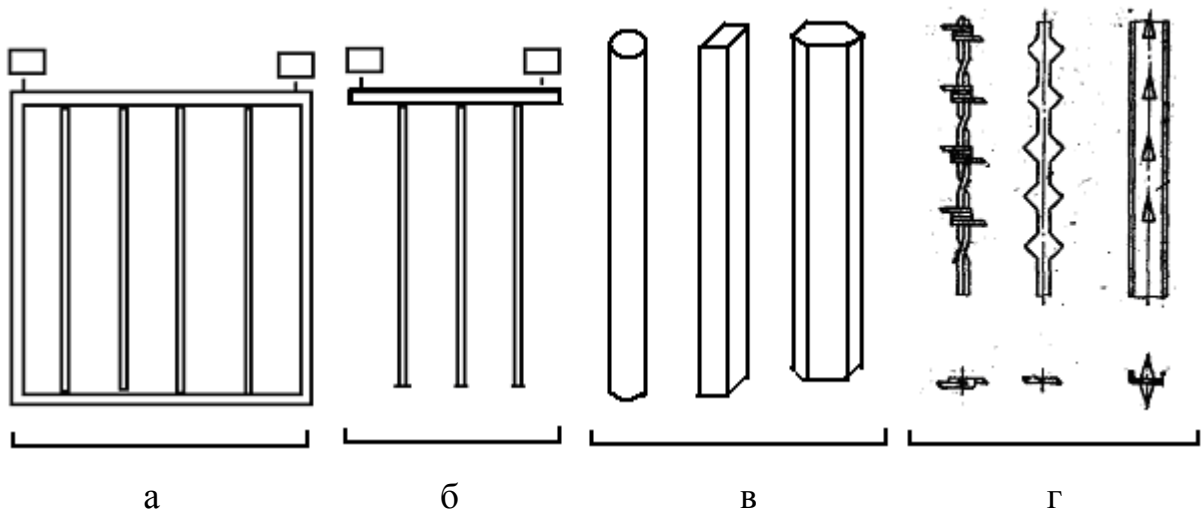


Рисунок 4.6 – Коронуючі електроди:
а – рамкові; б – вільно підвішені; в – із нефіксованими точками розряду;
г – із фіксованими точками розряду

Коронуючі електроди з фіксованими точками розряду мають голки, на яких і виникає коронний розряд. Змінюючи крок голок та їх висоту, можна отримати необхідне значення струму корони.

Ізолятори в електрофільтрах використовують для ізолювання металоконструкцій від струмонесучих частин коронуючої системи, водночас вони виконують роль несучих конструкцій. В електрофільтрах використовують кварцові, порцелянові, паперово-бакелітові, ситалові (ситали – кристальоване скло) ізолятори.

Бункери електрофільтрів слугують для накопичення вловленого пилю. Кількість бункерів визначають за виробничою здатністю апарату. Для зручності монтажу та експлуатації електрофільтра зазвичай кожне його поле обладнують бункером.

4.2.2 Агрегати живлення електрофільтра

Живлення електрофільтрів здійснюється за допомогою постійного струму високої напруги (60–80 кВ). Для перетворення змінного струму звичайної частоти (50 Гц) та низької напруги (380 В) використовують електричні агрегати живлення електрофільтрів із потужністю 20–150 кВт. Кожен агрегат складається з підвищувального трансформатора, випрямляча, регулятора напруги та пульта управління.

Для підвищення напруги в електроагрегатах використовують спеціальні, здебільшого однофазні трансформатори. Умови роботи електрофільтрів передбачають особливі вимоги щодо конструкції трансформатора – можливість довготривало витримувати електродинамічні перенавантаження, що виникають при пробоях в електрофільтрах.

У зв'язку з безперервним змінюванням температури, вологості, запиленості та інших параметрів газового потоку електричний режим електрофільтрів постійно змінюється. Незначне зниження робочою напруги (на 1 %) призводить до істотного зниження струму корони (на 5 %), унаслідок чого знижується ефективність електрофільтра.

Максимально можлива (за умовами пробою) напруга на електродах у сучасному агрегаті живлення підтримується автоматично. При цьому автоматичний електричний режим роботи електрофільтра здійснюється за допомогою таких методів:

– підтримання напруги на межі дугового пробою – напруга на електродах плавно підвищується до виникнення пробою. У момент пробою напруга вимикається на 0,5–3 с або різко знижується до значення, що забезпечує гасіння дуги. За час відімкнення напруга автоматично знижується на невелике значення таким чином, щоб при повторному ввімкненні не виникало дугового розряду. Далі напруга знову поступово піднімається до настання пробою, після чого знову відбувається відімкнення, і цикл повторюється. При такому періодичному способі регулювання більшу частину часу електрофільтр працює у безіскровій зоні напруги. Як наслідок, робоча напруга на електродах нижча за максимально можливий рівень;

– за заданою кількістю іскрових розрядів – при роботі в зоні іскрових розрядів робоча напруга близька до максимально можливої, відповідно, ступінь очистки є найбільш високим. Встановлено, що оптимальна величина напруги визначається кількістю іскрових розрядів за хвилину. Найбільш оптимальний – 40–70 іскрових зарядів за хвилину. При більшій кількості іскрових зарядів ефективність роботи електрофільтра знижується внаслідок збільшення втрат потужності в режимі частих іскрових пробоїв. Недоліком системи регулювання за кількістю іскрових розрядів є робота за заданою постійною кількістю іскрових розрядів. Однак оптимальна частота іскрових розрядів змінюється зі зміною параметрів газового потоку та пробивної міцності розрядного проміжку, на які система не реагує;

– за максимальною середньою напругою на електродах – цього недоліку позбавлена екстремальна система регулювання, оскільки підтримується максимальна середня напруга на електродах. Зі збільшенням первинної напруги трансформатора середнє значення напруги на електродах спочатку лінійно

зростає та досягає максимуму, а потім починає зменшуватись унаслідок зростання інтенсивності іскрових розрядів. Максимальна середня напруга на електродах відповідає оптимальній кількості іскрових розрядів у міжелектродних проміжках електрофільтра, тому підтримка на максимальному рівні значення середньої напруги на електродах відповідає режиму роботи електрофільтра при оптимальній кількості іскрових розрядів. Оптимальна кількість іскрових розрядів змінюється зі зміною параметрів газового потоку в широких межах.

4.2.3 Розрахунок ефективності електрофільтра

Умовою осадження часток пилу на поверхню електроду є забезпечення певного співвідношення між швидкістю газу, швидкістю дрейфу частки та міжелектродним проміжком.

У мокрих електрофільтрах при досягненні частками електродів процес вловлювання можна вважати закінченим. Змочені частки прилипають до електродів і змиваються водою, віддаючи їх свій заряд внаслідок хорошої провідності. У сухих електрофільтрах на процес очищення впливає вторинний винос часток пилу, що вже осаджені на електродах, та винос часток при струшуванні електродів.

Теоретичний вираз для парціальної ефективності електрофільтра було запропоновано Дейчем:

$$\eta_n = 1 - e^{-\frac{2wL}{WR}} \text{ – для трубчастого електрофільтра;}$$

$$\eta_n = 1 - e^{-\frac{wL}{WH}} \text{ – для пластинчастого електрофільтра,}$$

де w – швидкість дрейфу часток, м/с;

W – швидкість газу в активному перетині, м/с;

L – активна зона електрофільтра, м;

R – радіус трубчастого осаджувального електроду, м;

H – відстань між коронуємим електродом та пластинчастим осаджувальним електродом.

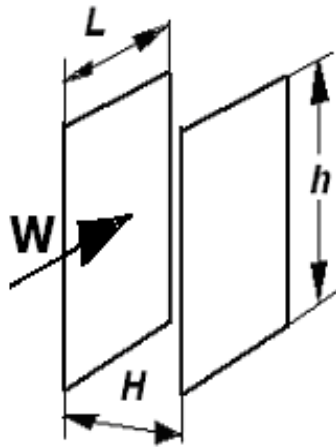


Рисунок 4.7 – Схема осаджувальних електродів електрофільтра

Введемо поняття питомої поверхні осадження f , що розраховується за такою формулою:

$$f = \frac{S}{Q} = \frac{Lh}{WHh} = \frac{L}{WH},$$

де S – площа поверхні осадження осаджувальних електродів;

Q – об'ємна витрата очищуваних газів.

Підставивши формулу f у формулу парціальної ефективності пластинчастого електрофільтра, отримаємо такий вираз:

$$\eta_n = 1 - e^{-wf}.$$

З наведеної формули випливає, що ступінь очистки в електрофільтрі залежить від швидкості дрейфу та питомої поверхні осадження.

Прирівнюючи силу взаємодії між електродом та зарядом частки, з одного боку, та силу аеродинамічного опору руху частки, з іншого боку, можна теоретично визначити швидкість руху частки до осаджувального електрода, тобто швидкість дрейфу.

Для крупних часток ($d_q > 1\text{мкм}$) швидкість дрейфу визначається за формулою

$$w = 0,188 \cdot 10^{-10} \frac{E^2 R_q}{\mu}.$$

Таким чином, швидкість дрейфу частки прямо пропорційна її розміру і квадрату напруженості електричного поля.

Для дрібних часток ($d_q \leq 1\text{мкм}$) швидкість дрейфу визначається за формулою

$$w = 0,17 \cdot 10^{-10} \frac{EC_k}{\mu},$$

де C_k – поправка Кеннінгема – Міллікена;

$$C_k = 1 + \frac{A \cdot \lambda}{r},$$

де λ – довжина середнього вільного пробігу молекул газу; $\lambda = 10-7$ м;

A – чисельний коефіцієнт, що розміщується в межах 0,815–1,63.

Варто зазначити, що теоретичний розрахунок ступеня очистки є ненадійним. На практиці формулу η_n використовують у тих випадках, коли є досвід експлуатації аналогічного електрофільтра в аналогічних умовах. Виходячи з фактичного значення η у фільтрі-аналізаторі знаходять w та використовують для розрахунку η нового електрофільтра.

Загальний ступінь очистки в електрофільтрі визначають за формулою

$$\eta = 1 - \exp(-K_{вин} A \beta^{0.42}),$$

де $K_{вин}$ – узагальнений коефіцієнт вторинного винесення;

A, β – безрозмірні параметри.

4.2.4 Фактори впливу на ефективність очищення в електрофільтрі

Факторами, що впливають на ефективність роботи електрофільтра є:

1) швидкість газу в активному перерізі апарату.

Швидкість газу в активному перетині є визначаюльним фактором. Вона пов'язана з активною довжиною електрофільтра за параметром «час перебування газопилового потоку в апараті» або питомою поверхнею осадження електрофільтра f .

З формули Дейча випливає, що для забезпечення необхідного ступеня очистки збільшення швидкості газу може бути компенсоване збільшенням активної зони електрофільтра.

Однак перевищення певної межі швидкості незалежно від довжини електрофільтра не може попередити зниження його ефективності. Це пов'язано, насамперед, з різким збільшенням вторинного винесення пилу з електродів. Збільшення швидкості газу в сухому електрофільтрі з 1,5 м/с до 3 м/с призводить до зростання виносу пилу при струшуванні у 8–10 разів, тому для фільтрів з плоскими осаджувальними електродами швидкість газу приймається зазвичай у межах до 0,8–1 м/с. У сухих електрофільтрах із профільованими електродами верхня межа швидкості газу зазвичай не перевищує 1,5–1,7 м/с;

2) електричні параметри електрофільтра.

Визначальним серед них є напруженість електричного поля E . Згідно з формулою розрахунку швидкості дрейфу для крупних часток швидкість дрейфу прямо пропорційна напруженості електричного поля.

Напруженість визначається величинами напруги між осаджувальними електродами U та міжелектродного проміжку H :

$$E \approx \frac{U}{H}.$$

Найоптимальніші умови для осадження часток створюються при підтримці максимальної напруги на електродах;

3) концентрація та дисперсність часток.

Велика вхідна концентрація часток пилу (їх об'ємний заряд) призводить до затухання струму коронного розряду, тобто виникає так зване «запирання», або «затухання» корони.

У чистому газі струм корони завжди більший, ніж у запиленому. Це пояснюється тим, що швидкість іонів ($W_i = 60\text{--}100$ м/с) є значно вищою за швидкість заряджених часток пилу ($W_p = 0,2\text{--}0,4$ м/с), тому виникнення заряду на частках пилу зменшує струм корони.

У полі електрофільтра струм корони можна представити як складову з двох доданків:

$$i_o = i_i + i_n,$$

де i_i , i_n – струми, спричинені рухом іонів та рухом часток пилу відповідно.

Унаслідок малої швидкості руху часток пилу складова струму i_n в нормально працюючому електрофільтрі не перевищує 1–2 % від загального струму. Зі збільшенням запиленості газу струм корони зменшується і при концентрації 25–35 г/м³ може впасти майже до нуля – настає «запирання корони». Таким чином, «запирання корони» настає тоді, коли об’ємний заряд часток пилу стає рівним об’ємному заряду генерованих іонів, тобто іонна складова струму корони перетворюється на нуль.

Фракції пилу розміром 0,1–0,3 мкм найгірше вловлюються в електрофільтрі, оскільки ці частки мають мінімальну швидкість дрейфу.

Для попередження запирання корони рекомендується:

- зниження вхідної запиленості (механічна попередня очистка);
- підвищення робочого напруження на електродах;
- зменшення швидкості газу в електрофільтрі;
- використання багатопольових електрофільтрів;

4) питомий електричний опір пилу (ρ_v) – істотно впливає на процес осадження та видалення пилу з електрофільтра.

За розміром питомого електричного опору пил поділяється на три групи:

- низькоомний пил ($\rho_v < 10^2$ Ом·см);
- пил з $\rho_v = 10^2\text{--}10^8$ Ом·см;
- високоомний пил ($\rho_v > 10^8$ Ом·см).

Нормальний процес осадження та видалення з електродів характерний для пилу другої групи. При осадженні на електродах цей пил розряджається не одразу, а через деякий час. Цього часу достатньо для накопичення шару та формування з дрібних осаджених часток агломератів під дією електростатичних та аутогезійонних сил. Розмір агломератів забезпечує потрапляння в бункер значної частини пилу при струшуванні та незначний вторинний винос.

Низькоомний пил миттєво розряджається, потрапляючи на електрод. Пилінки не агломеруються за рахунок аутогезійонних сил, і більша частина осадженого пилу знову виноситься газовим потоком.

Високоомний пил, осаджуючись на електроді, утворює поруватий ізолюючий шар. При перевищенні декотрої критичної напруги в шарі відбувається електричний пробій поруватого шару – утворюється тонкий канал, заповнений позитивними іонами. Розвивається потужний зворотний коронний розряд («зворотна корона»), дія якого спрямована назустріч основному. Ефективність електрофільтра, що працює в режимі зворотної корони, різко знижується;

5) властивості очищеного газу.

На процес очистки в електрофільтрах впливають такі параметри:

- температура t ;
- вологість d ;
- щільність ρ ;
- хімічний склад (мікродомішки, наприклад SO_3).

Вплив температури очищеного газу та його вологості на ефективність вловлювання в сухих електрофільтрах визначається зв'язком цих параметрів з пробивною напругою та питомим електричним опором шару пилу (рис. 4.8).

Значення пробивної напруги зростає зі збільшенням щільності газу, тому при зниженні температури пробивна напруга збільшується, забезпечуючи сталу роботу електрофільтра при більш високій напрузі.

Водяна пара в газі збільшує його щільність, таким чином збільшуючи пробивну напругу і забезпечуючи кращі умови вловлювання.

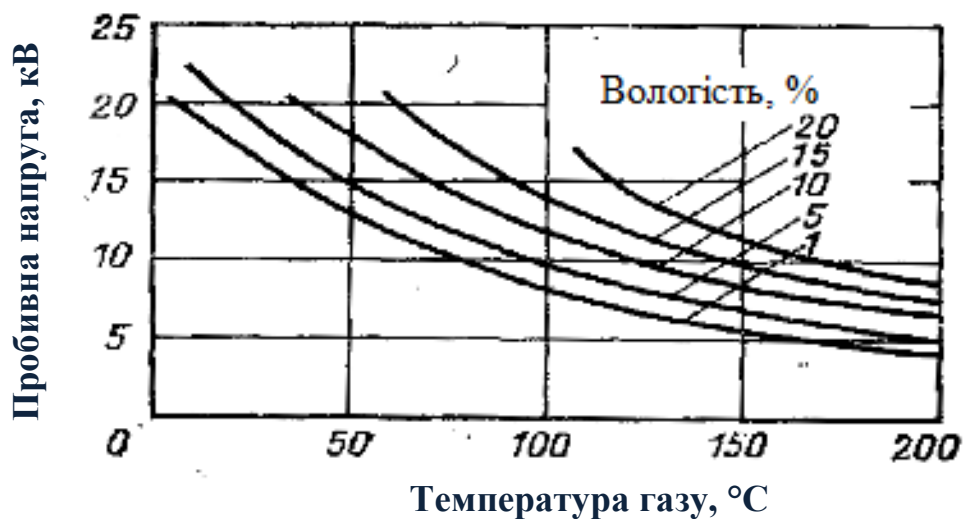


Рисунок 4.8 – Залежність пробивної напруги від температури та вологості газу

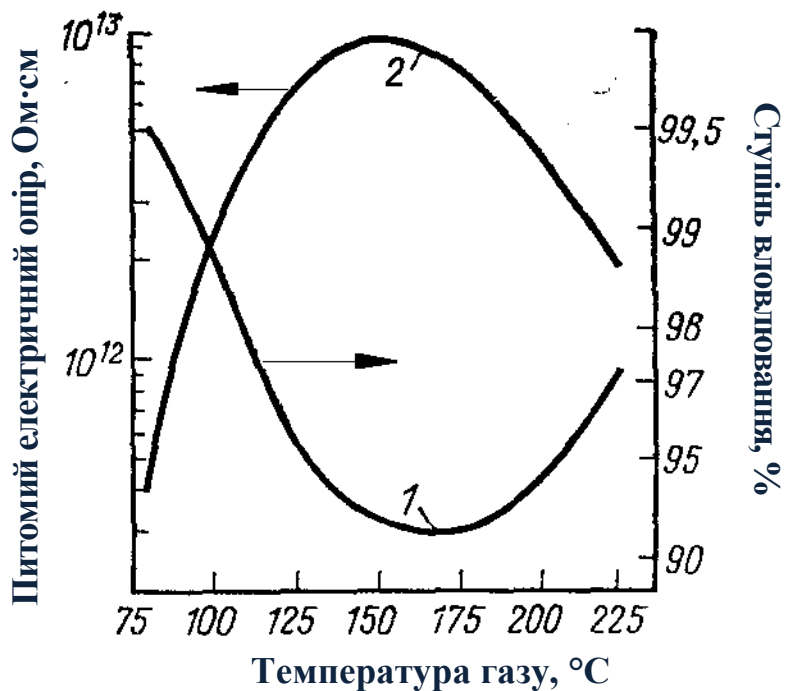


Рисунок 4.9 – Залежність питомого електричного опору та ступеня очистки від температури газу

Ступінь вловлювання часток залежить від їх розміру. Практика доводить, що в інтервалі розмірів часток від 1 до 20–40 мкм ефективність вловлювання зростає, а при подальшому збільшенні часток дещо знижується.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зацеркляний М. М. Процеси захисту навколишнього середовища [Електрон. ресурс] : підручник / М. М. Зацеркляний, О. М. Зацеркляний, Т. Б. Столевич. – Електрон. текст. дані. – Одеса : Фенікс, 2017. – 454 с. – Режим доступу: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Zatser_2017_454.pdf, вільний (дата звернення: 13.06.24). – Назва з екрана.

2. Захист навколишнього середовища при роботі теплотехнологічного устаткування [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / Н. А. Шаройко, А. О. Каграманян, І. П. Полтавський, В. В. Савенко. Електрон. текст. дані. – Харків : УкрДАЗТ, 2011. – 395 с. – Режим доступу: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/2342/1/%D0%9D%D0%B0%D0%B2%D1%87%D0%B0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf>, вільний (дата звернення: 13.06.24). – Назва з екрана.

3. Ратушняк Г. С. Засоби очищення газових викидів [Електрон. ресурс] : навч. посіб. / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 207 с. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/6972>, вільний (дата звернення: 13.06.24). – Назва з екрана.

4. Экология города : учебник / [Г. А. Белявский, Е. Д. Брыгинец, Ю. И. Вергелес и др.] ; под общ. ред. Ф. В. Стольберга. – Киев : Либра, 2000. – 464 с.

Електронне навчальне видання

БЕКЕТОВ Володимир Єгорович,
ЛОМАКІНА Ольга Сергіївна

ТЕХНОЛОГІЇ СУХОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОЧИСТКИ ГАЗІВ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 183 – Технології захисту навколишнього середовища)

Відповідальний за випуск *Д. В. Дядін*

Редактор *О. А. Норик*

Комп'ютерне верстання *Є. Г. Панова*

План 2023, поз. 13Л

Підп. до друку 15.08.2024. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк арк. 4,4.

Видавець та виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Черноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.

Електронна адреса office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.