

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

В. Є. Бекетов, О. С. Ломакіна, Г. П. Євтухова

ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності 101 – Екологія)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2023**

Бекетов В. Є. Захист атмосфери від забруднень : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 101 – Екологія / В. Є. Бекетов, О. С. Ломакіна, Г. П. Євтухова ; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 128 с.

Автори:

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

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 № 1 від 05.09.2022

Конспект лекцій складено з метою допомогти здобувачам екологічних спеціальностей під час підготовки до занять та контрольних заходів із курсу «Захист атмосфери від забруднень».

© В. Є. Бекетов, О. С. Ломакіна,
Г. П. Євтухова, 2023

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Заходи щодо охорони атмосферного повітря	6
1.1 Організація санітарно-захисних зон	6
1.2 Інженерно-організаційні заходи.....	9
1.3 Архітектурно-планувальні заходи	9
1.4 Упровадження безвідходних і маловідходних технологій	11
1.5 Використання технічних засобів та технологій очистки газів	12
2 Ефективність роботи апаратів очистки газів	13
3 Основи технології і обладнання сухої очистки газів	17
3.1 Апарати гравітаційної й інерційної очистки газів	18
3.1.1 Фізичні основи гравітаційного та інерційного осадження пилу .	18
3.1.2 Пилоосаджувальні камери	20
3.2 Апарати відцентрової дії	22
3.2.1 Призначення, будова та принцип дії циклонів	22
3.2.2 Основи теорії циклонів	24
3.2.3 Практичні рекомендації з вибору та розрахунку циклонів	26
3.2.4 Батарейні циклони	30
3.2.5 Жалюзійні пиловловлювачі	32
3.2.6 Інерційні пиловловлювачі	33
3.2.7 Пиловловлювачі ротаційної дії	34
3.3 Фільтри	35
3.3.1 Загальні відомості про процес фільтрації	35
3.3.2 Характеристики поруватої перетинки	36
3.3.3 Механізми процесу фільтрації	40
3.3.4 Призначення, будова, принцип дії та основи розрахунку різних типів фільтрів	44
3.3.5 Електрофільтри	50
4 Основи технології і обладнання мокрого очищення газів	68
4.1 Фізичні основи мокрої очистки газів. Розрахунок мокрих пиловловлювачів	68
4.1.1 Вловлювання часток пилу краплями рідини	69
4.1.2 Вловлювання часток на плівці рідини. Барботаж	72
4.1.3 Ефективність апаратів мокрого очищення газів. Енергетичний метод розрахунку	75
4.1.4 Тепло- й масообмін в мокрих пиловловлювачах	77
4.2 Апарати мокрої очистки газів	81
4.2.1 Форсункові скрубери	81

4.2.2 Механічні та динамічні газопромивачі	83
4.2.3 Скрубери Вентурі	85
4.2.4 Апарати відцентрової дії	90
4.2.5 Апарати ударно-інерційної дії	92
4.2.6 Барботажні пінні апарати	95
4.3 Допоміжне обладнання мокрої очистки газів	98
4.3.1 Краплевлловлювачі	100
4.3.2 Обладнання для підведення та диспергування рідини	102
4.4 Очистка промислових викидів від газових домішок	105
4.4.1 Абсорбція	106
4.4.2 Хемосорбція	110
4.4.3 Адсорбція	111
4.4.4 Термічне очищення газів	114
4.4.5 Каталітична очистка газів	116
4.4.6 Біохімічна очистка газів	121
4.4.7 Зниження токсичних викидів від автотранспорту	122
Список рекомендованих джерел	127

ВСТУП

Дисципліна «Захист атмосфери від забруднень» входить до програми підготовки здобувачів зі спеціальності 101 – Екологія.

Дисципліна «Захист атмосфери від забруднень» надає здобувачу знання, що дозволяють вирішувати конкретні виробничі завдання з вибору найбільш ефективної технології газоочищення від твердих, рідких та газоподібних домішок, виконувати необхідні технологічні розрахунки і розрахунки ефективності газоочисного обладнання для забезпечення захисту атмосферного повітря від забруднення.

У конспекті надано теоретичні основи сухої механічної та мокрої очистки газів від твердих домішок; описано будову, принцип дії і основи розрахунку апаратів сухої та мокрої очистки газів і допоміжного обладнання; наведено основи сорбційної, каталітичної, термічної і біохімічної технологій очистки газів, що використовуються для забезпечення екологічної безпеки повітряного басейну міста.

1 ЗАХОДИ ЩОДО ОХОРОНИ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Заходи щодо охорони атмосферного повітря умовно поділяють на наступні групи:

- а) організація санітарно-захисних зон;
- б) інженерно-організаційні заходи;
- в) архітектурно-планувальні заходи;
- г) впровадження безвідходних та маловідходних технологій;
- д) використання технічних засобів і технологій очистки газів.

1.1 Організація санітарно-захисних зон

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

Розміри СЗЗ до межі житлової забудови встановлюють залежно від:

- потужності підприємства;
- умов здійснення технологічного процесу;
- характеру 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
ІА	3 000
ІБ	1 000
ІІ	500
ІІІ	300
ІV	100
V	50

За наявності несприятливих умов для розсіювання домішок в атмосфері та /або неможливості зниження об'єму 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 підтверджуватись 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:

- об'єктів більш низького класу шкідливості, ніж основне виробництво;
- складів;
- гаражів;
- автостоянок;
- адміністративних будов;
- науково-дослідних лабораторій.

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

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

Територія СЗЗ повинна бути благоустроєною та озелененою.

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

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

У випадку, коли розрахунково не підтверджується розмір СЗЗ, необхідно приймати рішення про зміну технології, яка передбачає зниження об'єму викидів, перепрофілювання або закриття підприємства.

Розміри СЗЗ, які отримані розрахунковим шляхом, повинні уточнюватися окремо для різних напрямків вітру в залежності від результатів розрахунку забруднення атмосфери й середньорічної рози вітрів району розташування підприємства:

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

де L – розрахунковий розмір СЗЗ, м;

L_o – розрахунковий розмір ділянки місцевості в заданому напрямку, 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 $P_o = 100/8 = 12,5$ %).

Якщо у відповідності з розрахунком отримані розміри СЗЗ є більшими, ніж розміри, які встановлені «Державними санітарними правилами планування та забудови населених пунктів», то необхідно переглянути проектні 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, то розміри приймаються у відповідності до результатів розрахунку забруднення атмосфери.

1.2 Інженерно-організаційні заходи

Основні інженерно-організаційні заходи включають таке:

1. Зниження інтенсивності й організація руху автотранспорту.

Для цього ведеться будівництво об'їзних та окружних доріг навколо міст та населених пунктів, облаштування розв'язок для перетину доріг на різних рівнях, організація на основних міських магістралях руху за принципом «зеленої хвилі».

2. 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 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 висотою більш за 150 м.

3. Збільшення швидкості руху газів в димовій трубі.

Це сприяє збільшенню начального підйому викидів, поліпшенню умов їх розсіювання. З іншого боку, при цьому зростає гідравлічний опір димової труби і відповідно питомі енерговитрати на транспортування газів.

1.3 Архітектурно-планувальні заходи

До архітектурно-планувальних відносяться заходи, які 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 місті, яке добре провітрюється вітрами (рис. 1.1).

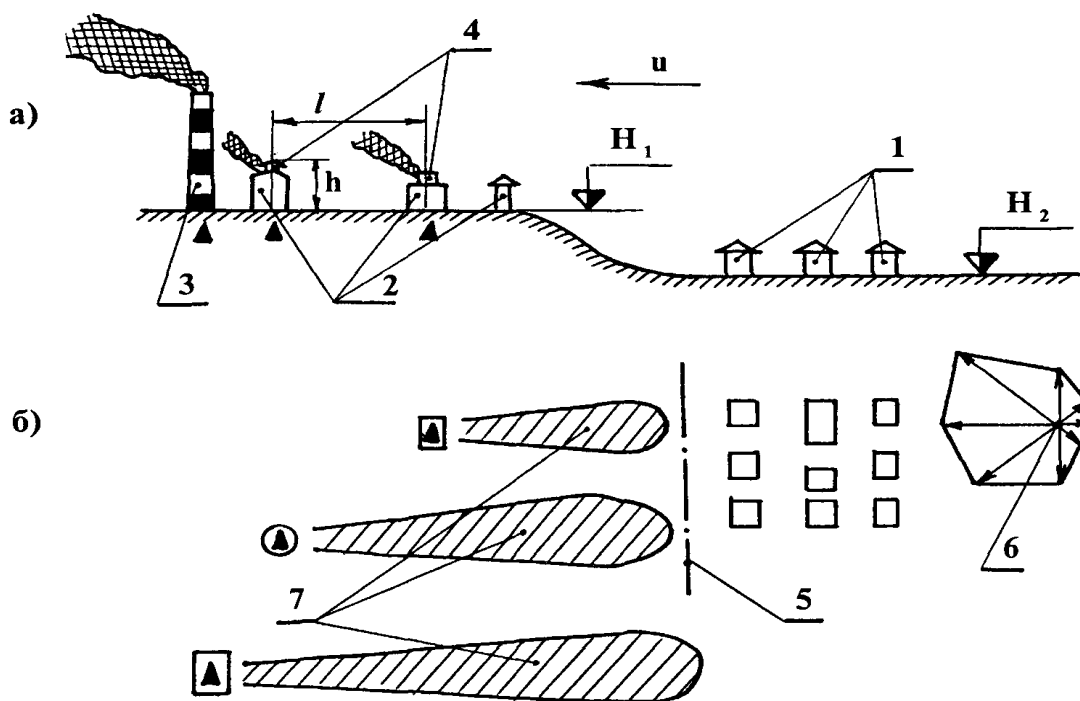


Рисунок 1.1 – Схема розміщення «підприємство-житлова зона»:

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 розташовуватись вище за промайданчик підприємства. В іншому випадку 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 під час видалення забруднюючих

речовин через аераційні ліхтарі повинна бути більш ніж вісім висот попередньо розташованої будови, якщо вона широка ($l > 8h$), і десяти, якщо вона є вузькою ($l > 10h$). В цьому випадку забруднюючі речовини не будуть накопичуватися в зоні між корпусами.

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

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

1.4 Упровадження безвідходних і маловідходних технологій

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

Найбільш перспективними напрямками на сьогодні є такі:

- перехід енергетики на нові види палива, заміна вугілля природним газом, що дозволяє суттєво знизити рівень забруднення атмосфери пилом та SO_2 ;
- заміна автомобілів з бензиновими двигунами на автомобілі з двигунами, що працюють на зрідженому природному газі, поширення електротранспорту;
- 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.

1.5 Використання технічних засобів та технологій очистки газів

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

Причиною цього є таке:

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

- 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;

- можливість повторного використання вловленого продукту;

- 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.

2 ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ АПАРАТІВ ОЧИСТКИ ГАЗІВ

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

- ступінь (ефективність) очистки газів;
- коефіцієнт проскока;
- 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.

При роботі газоочисного апарату без витоків та підсмоктування повітря, визначивши концентрацію забруднюючої речовини відносно одиниці об'єму сухого газу, приведенного до нормальних умов, ступінь очистки можна виразити такою формулою:

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

Коефіцієнт проскока – 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 проскока користуються у випадках, коли необхідно оцінити кінцеву запиленість або порівняти відносну запиленість газів на виході з різних типів апаратів.

Коефіцієнт проскока та ступінь очистки можуть бути виражені у долях 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 даної фракції, вловленої в апараті, до кількості пилу, тієї ж фракції, що входить до апарату очистки.

Парціальний ступінь (коефіцієнт) очистки – це співвідношення кількості часток даного розміру, вловленої в апараті, до кількості пилу до кількості часток того ж розміру на вході в апарат.

Фракційний коефіцієнт очистки можна визначити як середнє значення парціальних коефіцієнтів очистки часток пилу, що входять до даної фракції. Графічне зображення фракційного та парціального ступеню очистки представлено на рисунку 2.1.

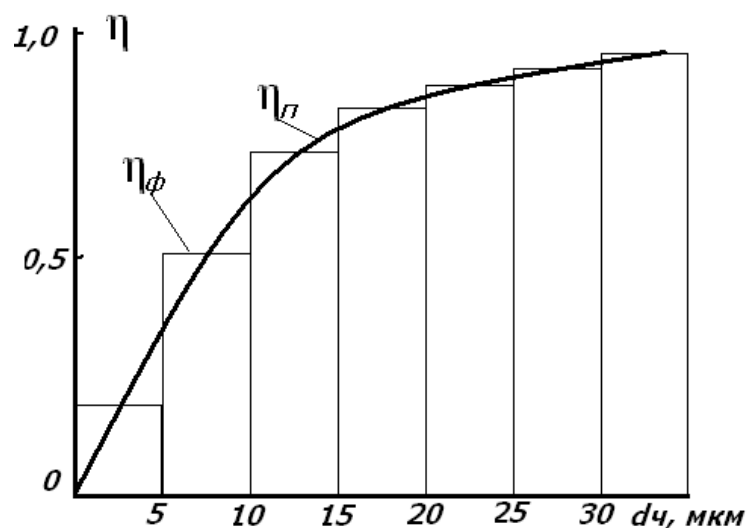


Рисунок 2.1 – Залежність фракційного та парціального ступенів очистки від розміру часток

Фракційний коефіцієнт очистки η_ϕ знаходять за формулою:

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

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

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

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

Парціальний коефіцієнт очистки η_n знаходять за формулою

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

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

$N_{вл}, N_{вх}$ – кількість часток (%) даного розміру, що вловлені 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 даного діаметру на вході в апарат.

Остання формула може бути записана більш вірно таким чином:

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

Часто графічна залежність $\eta_n = f(d_u)$, що побудована в імовірнісно-логічній системі координат, приймає вигляд прямої лінії і може бути записана у вигляді інтегралу ймовірності:

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

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

$\lg \sigma_\eta$ – стандартне відхилення в функції розподілу парціальних коефіцієнтів очистки;

Значення d_{50} знаходять як абсцису точки графіка $\eta_n = f(d_u)$ з ординатою, що дорівнює 50 %, а $\lg \sigma_\eta$ – із 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 логарифмічно нормальним, то значення повного коефіцієнту 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:

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

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, ... і-му пиловловлювачі.

При цьому необхідно враховувати зміну фракційного складу пилу при переході до кожного наступного апарату очистки.

3 ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ І ОБЛАДНАННЯ СУХОЇ ОЧИСТКИ ГАЗІВ

В основу класифікації технічних засобів й технологій очистки газів покладено спосіб очистки, що застосовується. Так, для очистки від твердих та рідких часток застосовують такі методи:

- сухої інерційної очистки;
- мокрої очистки;
- фільтрації;
- електростатичного осадження.

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

- абсорбції;
- адсорбції;
- термічної очистки;
- каталітичної очистки;
- біохімічної очистки.

Основними вимогами до газоочисного обладнання (ГОО) є висока ефективність та експлуатаційна надійність. Збільшення необхідного ступеню очистки та зменшення розміру вловлюваних часток призводить до збільшення капітальних та експлуатаційних витрат та газоочистку. Оптимальний варіант технології та апарату очистки визначають за результатами техніко-економічної оцінки (ТЕО). ТЕО проводиться при порівнянні впроваджуваного об'єкту з найкращими діючими аналогами.

Як правило, ГОО не приносить прямого прибутку. Вловлений продукт покриває лише частину витрат. Однак, якщо брати до уваги попереджений збиток від можливого забруднення атмосферного повітря при відсутності очистки газів, то показники прибутку та рентабельності ГОО набувають реального значення.

3.1 Апарати гравітаційної й інерційної очистки газів

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 часто є недостатньою, тому їх використовують у якості першого ступеню 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.

3.1.1 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 у відповідності до закону Ньютона виражається таким чином (Н):

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

де w – 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 наступною формулою:

$$Re = \frac{w_o d_r}{\nu_g} = \frac{w_o d_q \rho_g}{\mu_g}.$$

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

З урахуванням вищенаведених формул Re та C_x , розрахункова формула для F_c приймає такий вигляд:

$$F_c = \frac{24 \cdot \mu_z}{w_o \cdot d_u \cdot \rho_u} \cdot \frac{\pi \cdot d_u^2}{4} \cdot \frac{\rho_z \cdot w_o^2}{2} = 3 \cdot \pi \cdot d_u \cdot \mu_z \cdot w_o.$$

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

$$F_g = mg = \rho_u V_u g = \rho_u \frac{\pi d_u^3}{6} g,$$

$$F_a = m_z g = \rho_z \frac{\pi d_u^3}{6} g.$$

Частка знаходиться у рівновазі, якщо виконується така умова:

$$F_g - F_a - F_c = 0.$$

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

$$3\pi d_u \mu_z w_o = (\rho_u - \rho_z) \frac{\pi d_u^3}{6} g,$$

звідки отримаємо розрахункову формулу для визначення швидкості витання частки пилу:

$$w_o = \frac{d_u^2 (\rho_u - \rho_z) g}{18 \mu_z},$$

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

Розв'язуючи рівняння w_o відносно d_u , отримуємо, що

$$d_u = \sqrt{\frac{18 \mu_z w_o}{(\rho_u - \rho_z) g}}.$$

Отриманий вираз показує, що при постійних густині ρ_z та в'язкості газового середовища μ_z кожній швидкості витання відповідає свій розмір частки.

3.1.2 Пилоосаджувальні камери

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

ПК використовують в якості першого ступеню 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 3.1.

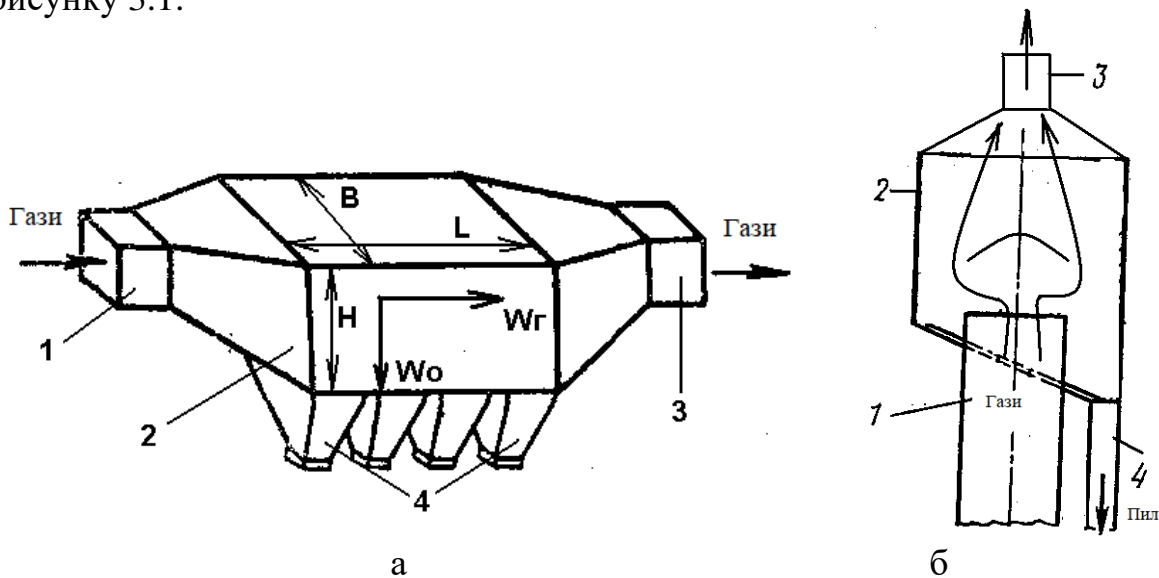


Рисунок 3.1 – Пилоосаджувальна камера:

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 до 7,6 м/с та залежить від щільності, розміру та форми часток (табл. 3.1).

Ступінь очистки визначається часом перебування часток в ПК, що викликає необхідність збільшення розмірів ПК. При приблизному розрахунку осаджувальних камер приймають, що частки рухаються вздовж камери зі

швидкістю, що дорівнює швидкості газового потоку W_r і одночасно опускаються донизу зі швидкістю, що дорівнює швидкості витання W_0 . Для осадження частка повинна досягнути дна раніше, ніж газовий потік винесе її з камери. Тому час осадження частки, у крайньому випадку, повинен дорівнювати часу перебування її у камері.

Таблиця 3.1 – Максимально допустимі швидкості газів в ПК.

Пил	Щільність часток, кг/м ³	Середньомедіанний 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:

$$\tau_0 = \frac{H}{W_0}.$$

Час перебування частки у камері визначається за формулою:

$$\tau_k = \frac{L}{W_2}.$$

Гранична умова осадження частки $\tau_0 = \tau_k$, тому

$$\frac{H}{W_0} = \frac{L}{W_2} \Rightarrow HW_2 = LW_0.$$

Витрата газу визначається за формулою:

$$Q_2 = FW_2 = HBW_2.$$

Поєднуючи останні два вирази, отримуємо, що

$$\frac{Q_2}{B} = LW_0 \Rightarrow Q_2 = BLW_0;$$

$$Q_2 = LB \frac{d_u^2 (\rho_u - \rho_2) g}{18\mu_2}.$$

В вищенаведеної формули можна визначити максимальну кількість газу, яку можна пропустити через камеру за умови осадження часток діаметром $d_{\text{ч}}$. Вирішуючи зворотню задачу, можна визначити діаметр часток, що будуть осаджуватися при пропусканні через камеру об'єму газу $Q_{\text{г}}$:

$$d = \sqrt{\frac{18\mu_{\text{г}}Q_{\text{г}}}{LB(\rho - \rho_{\text{г}})g}}.$$

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

3.2 Апарати відцентрової дії

3.2.1 Призначення, будова та принцип дії циклонів

Циклони є одними з найбільш розповсюджених пиловловлюючих апаратів. Вони призначені для вловлювання пилу розміром 15–20 мкм та більше.

Робота циклону заснована на використанні відцентрових сил, що виникають при обертанні газового потоку всередині корпусу циклона. Таке обертання досягається за рахунок тангенційного вводу газу в циклон або використанням завихрювача. В результаті дії відцентрових сил завислі у потоці газу частки пилу відкидаються на стінки корпусу та випадають з потоку. Звільнений від пилу газ продовжує обертатися, виконує поворот на 180° та виходить із циклону через розташовану на осі вихлопну трубу (рис. 3.2).

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

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 введenu вихлопну трубу та мають великий кут розкриття конічної частини. Циклони СІОТ відрізняються повною відсутністю циліндричної частини та мають трикутну форму вхідного патрубкa. Циклони ЦН, ЛІОТ, СІОТ є нормалізованими та будь який їхній діаметр може бути виражений у долях діаметру.

Основні конструктивні співвідношення циклонів залежать від типу обраного апарату. Для циклону ЦН-15 рекомендуються такі співвідношення відносно внутрішнього діаметру корпусу циклону D :

- внутрішній діаметр вихлопної труби $d = 0,59D$;
- діаметр пиловипускного отвору $d_1 = 0,3-0,4D$;
- ширина вхідного патрубкa $b = 0,2D$;
- висота вхідного патрубкa $a = 0,66D$;
- 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 $D_6 = 1,5D$;
- висота бункера $H_6 = 0,8D$.

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

Окрім циклонів зворотно-потокowego типу (до них відносяться 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 пилу внаслідок низької ефективності.

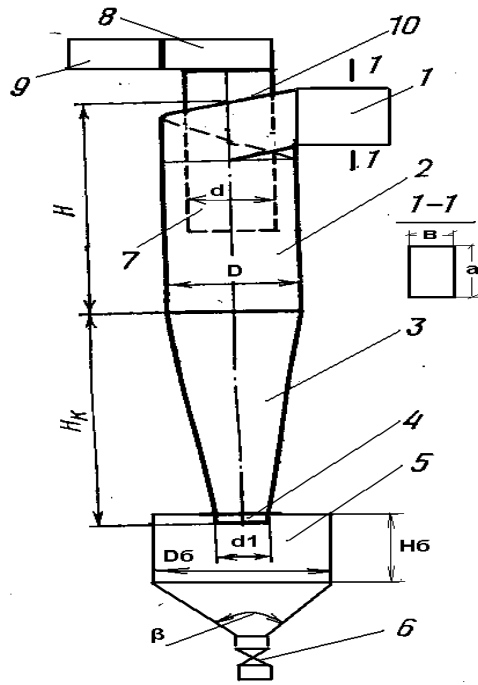


Рисунок 3.2 – Схема циклона:

- 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 – розкручуючий равлик; 9 – вихідний патрубок; 10 – нахилена кришка

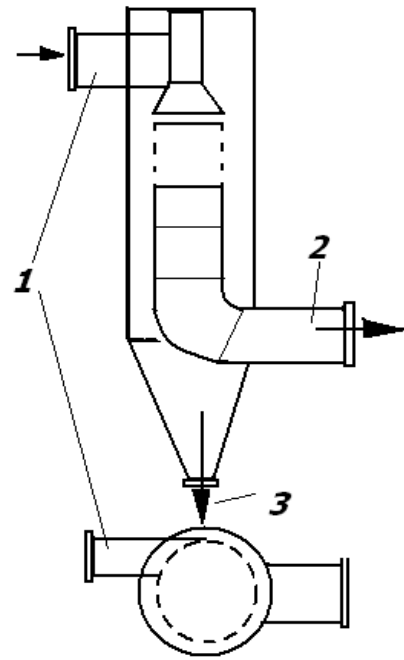


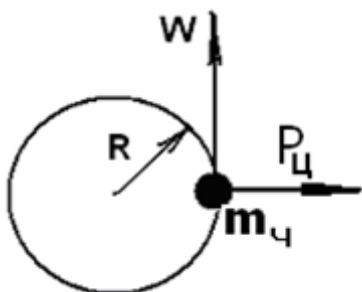
Рисунок 3.3 – Прямоточний циклон:

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

3.2.2 Основи теорії циклонів

Розглянемо частку пилу масою $m_{\text{ч}}$, що обертається в газовому потоці циклону по колу радіусом R зі швидкістю W .

Під впливом відцентрової сили $P_{\text{ц}}$ частка отримує швидкість у радіальному напрямку, зустрічаючи на своєму шляху опір газового слою.



$$P_{\text{ц}} = \frac{m_{\text{ч}} W^2}{R}$$

$$m_{\text{ч}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} \rho_{\text{ч}} \Rightarrow P_{\text{ц}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} \rho_{\text{ч}} \frac{W^2}{R}$$

Розглядаючи рух частки в радіальному напрямку в момент, коли сила опору врівноважить відцентрову силу, можна записати наступну формулу:

$$\frac{\pi d_c^3}{6} \rho_c \frac{W^2}{R} = 3\pi d_c \mu_2 w_0 .$$

В цієї формули виразимо швидкість частки, яка може бути досягнута в радіальному напрямку:

$$w_0 = \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{18 \mu_2 R} .$$

Швидкість переміщення частки в радіальному напрямку також можна записати в такому вигляді:

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

Об'єднуючи два останні рівняння, отримуємо наступне:

$$\frac{dR}{dt} = \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{18 \mu_2 R} .$$

Розділивши змінні, отримуємо, що

$$R dR = \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{18 \mu_2} dt .$$

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

$$\frac{1}{2} (R_2^2 - R_1^2) = \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{18 \mu_2} t \Rightarrow (R_2^2 - R_1^2) = \frac{d_c^2 \rho_c W^2}{9 \mu_2} t .$$

Час проходження часткою шляху $R_2 - R_1$ дорівнює

$$t = \frac{9 \mu_2 (R_2^2 - R_1^2)}{d_c^2 \rho_c W^2} .$$

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

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

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

Зважаючи на це, можна сказати, що параметри, що 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 – 0,6м;
- щільність часток – 1 930 кг/м³;
- динамічна в'язкість газу – $22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с;
- $d_{50} = 4,5$ мкм;
- стандартне відхилення в 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.

3.2.3 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 нормальної 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

дуже злипається, рекомендується використовувати циклони, здатні забезпечити необхідний ступінь очистки при порівняно невеликій швидкості пилогазового потоку на вході.

Розрахунок циклонів ведуть методом узагальнення та використання показників, які отримують при випробуваннях циклонів у промислових умовах.

Для розрахунку необхідно мати такі вихідні дані:

– кількість газу, що очищується (при робочих умовах) Q_{Γ} , м³/с;

– щільність газу ρ_{Γ} , кг/м³;

– динамічна в'язкість газу μ_{Γ} , Па·с;

– дисперсний склад пилу, що задається двома параметрами d_m , мкм та $\lg\sigma_{\Gamma}$;

– запиленість газу на вході в апарат $C_{\text{вх}}$, г/м³;

– щільність часток пилу $\rho_{\text{ч}}$, 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 $W_{\text{опт}}$. Для більшості циклонів $W_{\text{опт}} = 2-4,5$ м/с. Для ЦН-15 $W_{\text{опт}} = 3,5$ м/с;

2) визначають площу перетину циклону за формулою:

$$F = \frac{Q_{\Gamma}}{W_{\text{опт}}};$$

3) визначають діаметр циліндричної частини циклону за формулою:

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

Діаметр циклону 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 відхилятися від оптимальної більш ніж на 15%, за формулою:

$$W_{\text{д}} = \frac{Q_{\Gamma} \cdot 4}{\pi \cdot D^2};$$

5) визначають коефіцієнт гідравлічного опору за формулою:

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

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

K_1 – поправочний коефіцієнт на діаметр циклону;

K_2 – поправочний коефіцієнт на запиленість газу;

K_3 – поправочний коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, які пов'язані з компоновкою циклонів у групі (для одиночного циклону $K_3 = 0$, для групового компанування $K_3 = 35$).

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

Таблиця 3.2.– Поправочний коефіцієнт на вплив діаметру циклону K_1

D, мм	Марка циклону		
	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 3.3.– Поправочний коефіцієнт на запиленість газів K_2 (D=500мм)

Марка циклона	Запиленість $\cdot 10^3$, 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 в функції розподілу парціальних коефіцієнтів очистки $\lg \sigma_{\eta cy}$ для стандартних умов.

Параметри ЦН-15: $d_{50cy} = 4,50$; $\lg \sigma_{\eta cy} = 0,352$; $D_{cy} = 0,6$ м; $W_{cy} = 3,5$ м/с; $\rho_{cy} = 1\,930$ кг/м³;

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

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

9) визначають параметр X за формулою:

$$x = \frac{\lg(d_m / d_{50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_\mu}}$$

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 ступеню очистки η порівнюють з необхідним η_T . У випадку, коли $\eta < \eta_T$ необхідно буде обрати інший тип циклону з більшим коефіцієнтом гідравлічного опору.

Для орієнтовних розрахунків необхідного значення гідравлічного опору ζ_{um} рекомендується така залежність:

$$\zeta_{CT} = \zeta_{CP} \left(\frac{1 - \eta_P}{1 - \eta_T} \right)^2 \frac{W_P D_T}{W_T D_P}.$$

Збільшення діаметру циклону призводить до зниження його ефективності, внаслідок чого циклони типу ЦН з діаметром більшим за 1 000 мм використовувати не рекомендується. Це обмеження значно обмежує пропускну здатність газоочисних установок.

3.2.4 Батарейні циклони

В теперішній час розроблені прості за конструкцією циклонні елементи невеликого діаметру (100 мм, 150 мм, 250 мм) з високим ступенем очистки, які пристосовані для об'єднання у великі групи з високою пропускну здатністю – батарейні циклони.

Батарейний циклон (мультициклон) (рис. 3.4) представляє собою пиловловлюючий апарат, що складається з великої кількості паралельно встановлених циклонних елементів (рис. 3.5). Циклонні елементи об'єднані в одному корпусі, що має загальне відведення газів та загальний бункер для збору пилу.

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

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. В цих зазорах встановлені направляючі елементи – лопаті гвинта або лопаті розетки, що закручують потік газів. Вловлений пил через пиловивідні отвори надходить до загального бункера. Знепилений газ через вихідні труби надходить в камеру очищеного газу та у подальшому викидається в атмосферу через вихідний патрубок.

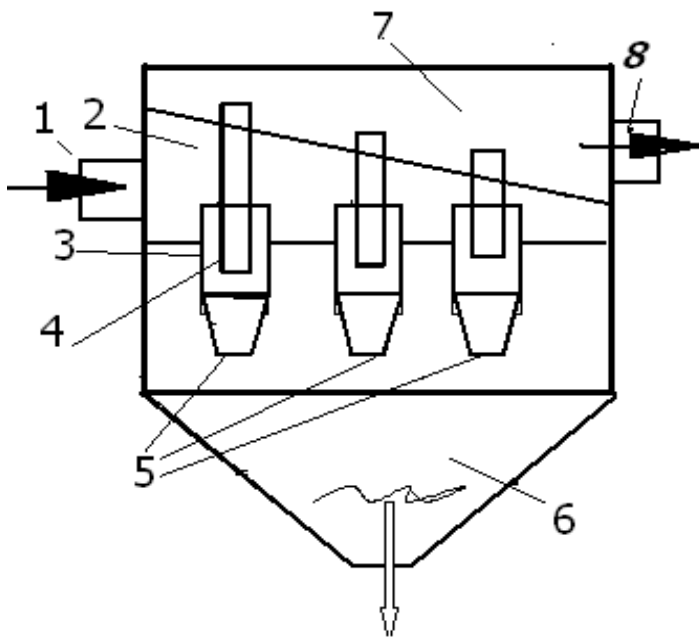


Рисунок 3.4 – Схема батарейного циклона:

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

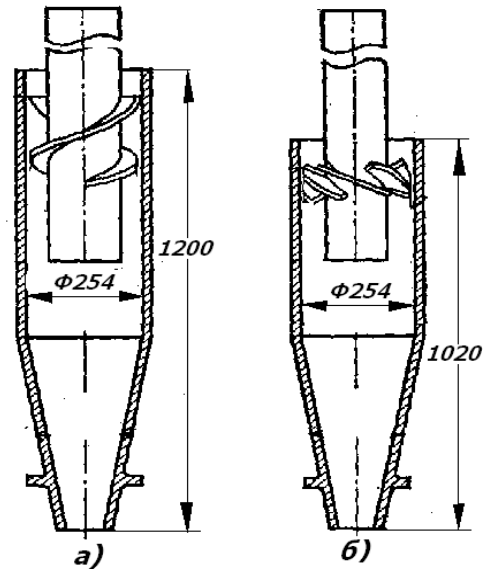


Рисунок 3.5 – Схема циклонних елементів:

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

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

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

3.2.5 Жалюзійні пиловловлювачі

Жалюзійні пиловловлювачі (рис. 3.6) призначені для вловлювання крупнодисперсного пилу з діаметром часток 30–40 мкм. 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 напрямку. Менша частина газу (10–20 %), що збагачена пилом, відводиться для очистки в циклон, після чого приєднується до основного потоку газу.

В основі роботи жалюзійних пиловловлювачів лежить інерційно-відбивний принцип. Частки пилу випадають з потоку при крутому повороті газу в жалюзійній решітці в результаті безпосереднього удару об пластину. В обох випадках частки попадають в меншу частину потоку, збагачуючи її пилом.

Ефективність вловлювання пилу η в жалюзійних пиловловлювачах залежить від ефективності решітки η_p , ефективності відсмоктуючого пиловловлювача (циклону) $\eta_{ц}$ та частки φ газу, що відсмоктується у циклон, визначається за формулою:

$$\eta = \eta_{ц} [1 - (1 - \varphi)(1 - \eta_p)] .$$

Для приблизних розрахунків можна використовувати такий вираз:

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

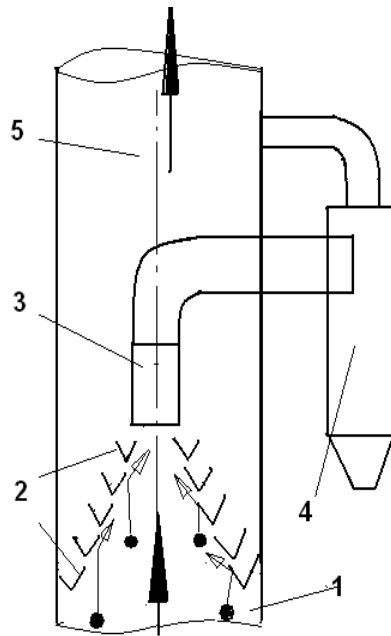


Рисунок 3.6 – Схема жалюзійного пиловловлювача:

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

Жалюзійні пиловловлювачі (золовловлювачі) характеризуються наступними параметрами:

- гідравлічний опір 100–500 Па;
- кінцева запиленість (пошарове спалювання) $1-2 / (0,2-0,7) \text{ г/м}^2$;
- кінцева запиленість (пилоподібне спалювання) $5-7 / (2-3) \text{ г/м}^2$.

3.2.6 Інерційні пиловловлювачі

Інерційні пиловловлювачі використовуються для грубої пилоочистки газів в якості першого ступеня очистки. Простіші пиловловлювачі інерційної дії наведені на рисунку 3.7.

Механізм осадження часток в інерційних пиловловлювачах заснований на зміні напрямку їх руху. Так 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. Влов-

лений пил висипається в бункер. Ефект пиловловлювання у значному ступені залежить від правильно підбраного кільцевого зазору.

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

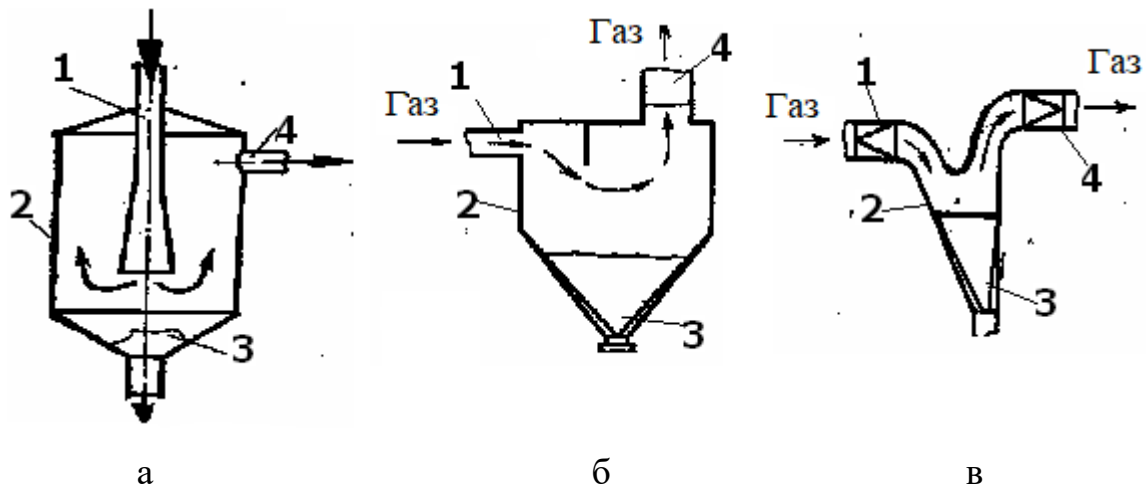


Рисунок 3.7 – Простіші інерційні пиловловлювачі:

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

3.2.7 Пиловловлювачі ротаційної дії

Пиловловлювачі ротаційної дії відносяться до апаратів грубої та напівтонкої очистки газів та ефективно вловлюють частки розміром більше за 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 розвиваючихся сил (відцентрової сили та

сили Коріоліса) з газу, що очищується, виділяється пил. Частки попадають на периферію колеса і одночасно переміщуються вздовж ротора в пилоприймаючий патрубок. Очищений газ виходить з пилоосаджувача через вихідний патрубок – патрубок чистого газу.

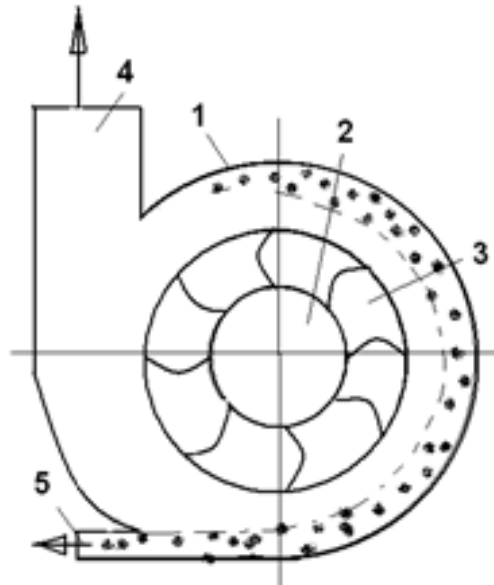


Рисунок 3.8 – Схема відцентрового пилоловлювача:

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

З динамічних апаратів найбільше поширення отримали димососи-пиловловлювачі (ДП) для вловлювання часток розміром більш за 15 мкм. ДП використовують для очистки газів малих котелень, у ливарному виробництві, на асфальтобетонних заводах для очищення газів від сушильних барабанів.

3.3 Фільтри

3.3.1 Загальні відомості про процес фільтрації

В основі роботи поруватих фільтрів усіх видів лежить фільтрація запиленого газу через порувату перетинку. В процесі фільтрації частки пилу, що завислі у газі, затримуються перетинкою, а газ безперешкодно проходить

крізь неї.

Фільтри з достатньою ефективністю можуть затримувати частки будь-якого діаметру. В залежності від типу фільтра та виду вловлюваного пилу частки можуть накопичуватися в усьому об'ємі фільтра або осаджуватись на лобовій поверхні перетинки, утворюючи фільтруючий пиловий шар.

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

В якості поруватих перетинок можуть використовуватися тканина, папір, волокнуватий матеріал, кераміка, металева сітка, зернуватий шар.

Як правило, розміри порових каналів перевищують розміри вловлюваних часток. Вловлювання часток, що проникають углиб поруватого матеріалу, відбувається за рахунок осадження їх на стінках каналів, де вони утримуються силами адгезії. У випадку, коли розмір часток є більшим за розмір порових каналів, має місце ситовий ефект.

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

3.3.2 Характеристики поруватої перетинки

До основних характеристик поруватої перетинки відносять:

1) поруватість (ϵ) 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:

$$\varepsilon = \frac{V_{nop}}{V} = \frac{V - V_m}{V} = \frac{M/\rho - M/\rho_m}{M/\rho} = \frac{1/\rho - 1/\rho_m}{1/\rho} = \frac{(\rho_m - \rho)/\rho\rho_m}{1/\rho} = \frac{\rho_m - \rho}{\rho_m},$$

де V_{nop} – об'єм пор фільтруючого матеріалу (пороватого 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, що 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. 3.9).

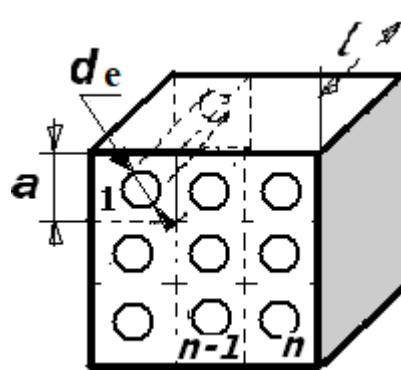


Рисунок 3.9 – Одиничний об'єм ідеального фільтруючого матеріалу

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

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

де f_o – відносний живий перетин порових каналів;

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

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

Виразимо значення ε , використовуючи отримане значення для S :

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

Звідси виразимо d_e таким чином:

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

Кількість порових каналів в одиниці об'єму дорівнює:

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

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:

$$S = nS_1 = \frac{V_m}{V_{m1}} S_1.$$

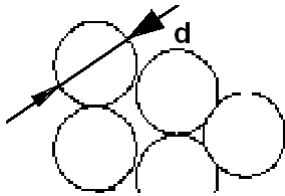
Враховуючи, що $\alpha = 1 - \varepsilon = \frac{V_m}{V_0} = V_m$, отримуємо $S = \frac{1 - \varepsilon}{V_{m1}} S_1$,

де V_0 – величина одиничного об'єму фільтруючого матеріалу.

З урахуванням його отримуємо такий вираз для діаметру порового каналу:

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

Розглянемо фільтруючий матеріал, що складається з часток сферичної форми:



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

$$S_1 = \pi d^2$$

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 діаметру сферичних часток;

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

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

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

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

$$w = \frac{Q_\varepsilon}{F_{омв}},$$

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

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

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

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), кг/м².

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

3.3.3 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 захвату.

Коефіцієнт захвату (η_3) – це відношення площі перетину пилогазового потоку, що набігає ($F_{оч}$), з якого всі частки повністю осаджуються на

фільтруючому елементі, до площі проєкції елемента (F_e) на площину, нормальну до напрямку руху потоку

$$\eta_z = \frac{F_{оч}}{F_e}.$$

У більшості випадків η_z визначають за формулами, що використовують як експериментальні, так і теоретичні данні.

Частки, що є завислими у газовому потоці, осаджуються в поруватому середовищі за рахунок нижченаведених ефектів (механізмів):

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 (рис.

Если частица движется по линии, проходящей возле твердого элемента фильтра на расстоянии, меньшем или равном радиусу частицы, она непременно коснется этого элемента и удержится на нем (рис. 3.10).

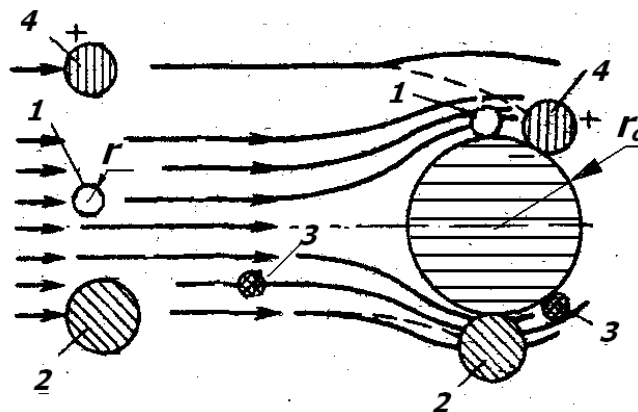


Рисунок 3.10 – Схема механізмів процесу фільтрації (механізм торкання)

Визначальний параметр ефекту торкання R :

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

де r – радіус частки;

r_0 – радіус твердого елемента (волокна) фільтра.

Для поодинокого циліндра (волокна фільтра) коефіцієнт захвату для

потенційного обтікання ($Re > 500$) за рахунок торкання буде дорівнювати

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

де Re – число Рейнольдса, віднесене до циліндру, що обтікається;

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 (рис. 3.11).

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

$$Stk = \frac{wd_q^2 \rho_q}{18\mu d_o},$$

где d_q – діаметр частки;

w – швидкість обтікання перепони;

ρ_q – щільність пилу;

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

d_o – визначальний діаметр твердого елемента фільтра.

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

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

Для часток діаметром більш за 1 мкм інерційний механізм має вирішальне значення;

3) дифузійний механізм.

За рахунок неврівноважених ударів молекул, що знаходяться у броуновському русі, відбувається зміщення дрібних часток з ліній току та осадження їх на перепонах, що обтікаються (рис. 3.11). Дифузійний механізм

переважає при осадженні часток діаметром менш за 0,5 мкм.

Коефіцієнт захвату за рахунок дифузії для поодинокого циліндра визначається за формулою Ленгмюра

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

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.

Захват часток може здійснюватись під дією сили тяжіння.

Коефіцієнт захвату для поодинокого горизонтально розташованого поперек потоку циліндра при вертикально спрямованому потоці газу можна знайти з виразу

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

де w_o – швидкість падіння частки (витання), що встановилась

$$w_o = \frac{d_c^2 \rho_c g}{18 \mu_z};$$

w_z – швидкість газового потоку;

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

$$Fr = \frac{w_z^2}{2g \cdot r_o};$$

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 суттєву роль при низьких швидкостях фільтрації – менш за 0,05 см/с;

5) електростатичний механізм

У випадку, коли волокно фільтра несе 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. 3.10).

Коефіцієнт електростатичного захвату визначається за формулою:

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

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

Сумарний коефіцієнт захвату знаходимо за формулою:

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

На практиці при визначенні η_Σ виділяють та враховують ті механізми захвату, що вносять найсуттєвіший вклад у процес осадження часток. Впливом другорядних механізмів осадження у першому наближенні нехбують.

3.3.4 Призначення, будова, принцип дії та основи розрахунку різних типів фільтрів

Тканинні фільтри

В 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 відходящих 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. 3.11), у кожній з яких розташовано декілька рукавів.

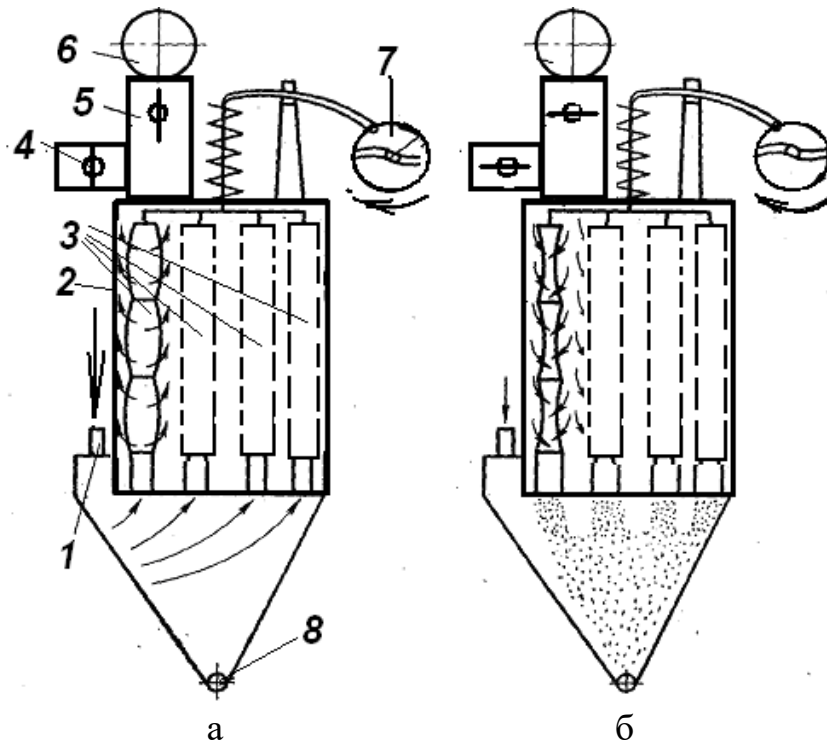


Рисунок 3.11 – Схема роботи рукавного фільтра:

а – фільтрація; б – регенерація;

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

Запилений газ поступає у нижню частину камери через патрубок та підводиться всередину рукавів. Фільтруючись через тканину, газ збирається в камері корпусу при закритому клапані та при відкритому клапані відводиться в колектор очищених газів. Частиці пилу осаджуються на внутрішній поверхні рукавів. Їх опір при цьому поступово збільшується. Коли опір досягає певного граничного значення, фільтр переводиться в режим регенерації.

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

При регенерації зворотним продуванням продувочне повітря від спеціального вентилятора через патрубок при відкритому клапані поступає всередину камери корпусу (випускний клапан при цьому є закритим). Фільтруючись через рукав у зворотному напрямку, продувочне повітря руйнує шар пилу, що осів на поверхні рукава. Для підвищення ефективності регенерації рукава струшують за допомогою спеціального механізму струшування. Пил осипається в бункер через пиловивантажувальний пристрій. Відпрацьований продувочний газ через вхідний патрубок поступає в газопровід брудного газу.

Камери фільтра переводять в режим регенерації по черзі. Відповідно, з «*n*»-встановлених камер в роботі завжди знаходиться «*n-1*» камера.

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

Класифікують тканинні фільтри за наступними 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, пласкі).

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

Найбільше поширення у промисловості отримали рукавні фільтри з наступними 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, накоплене на одиниці площі фільтра за час t , дорівнює:

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

Необхідну тривалість періоду між двома регенераціями t вирішують спільним вирішенням двох вищенаведених рівнянь, а саме

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

Кількість газу, що проходить через тканину, знаходимо за формулою:

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^1 + f W_{np} , \text{ м}^3/\text{с},$$

де V_{Γ}^1 – об'ємна витрата газу, що підводиться до фільтру;

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

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

Необхідна поверхня рукавів усіх секцій дорівнює

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

Необхідна кількість секцій складає:

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

3.3.4.2 Волокнуваті фільтри

Волокнуваті фільтри (набивні, мати, з картону, паперу тощо) являють собою поруваті перетинки (шари різної товщини), що складаються з неупорядковано розташованих волокон (рис. 3.12). Це фільтри об'ємної дії, оскільки вони розраховані на вловлювання та накопичення часток за всією своєю глибиною.

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

У зв'язку з високою поруватістю ($\epsilon \leq 0,1$) аерозольні частки легко проникають всередину матеріалу. Тому регенерація відпрацьованих фільтрів утруднена та нерентабельна. По закінченню терміну використання відпрацьоване фільтруюче середовище, як правило, змінюють на нову.

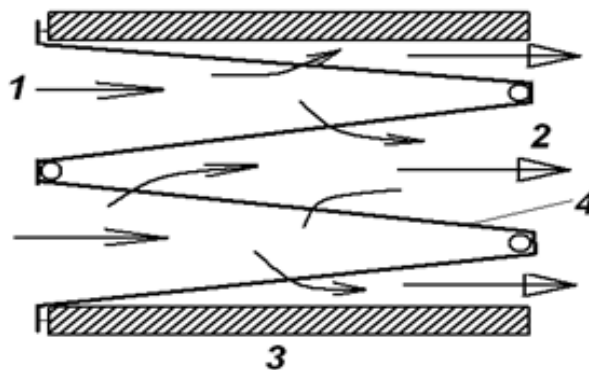


Рисунок 3.12 – Схема секції волокнуватого фільтра:

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) $700\text{--}1500 \text{ Па}$;
- ступінь очистки для дрібнодисперсних часток – $\geq 99 \%$;
- питома поверхня фільтрації $100\text{--}150 \text{ м}^2/1\text{м}^3$.

Зернуваті фільтри

В зернуватому фільтрі фільтруючий шар складається із зерен різної форми (сфери, кільця, гранули, шматки тощо). Фільтруючим матеріалом зернуватого фільтра можуть бути пісок, щебінка, 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 утруднено використання апаратів інших типів;

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

Зернуватий шар може бути використаний в якості:

– фільтруючої перетинки для очистки газів від твердих часток;

– катализатора або сорбенту при каталітичній та сорбційній очистці.

Вирізняють такі типи зернуватих фільтрів:

– зернуваті насадкові (насіпні) фільтри, в яких вловлюючі елементи жорстко не пов'язані одне з одним. До них відносять статистичні (нерухомі) пошарові фільтри, динамічні (рухомі) пошарові фільтри з гравітаційним переміщенням сипкого середовища, псевдоскраплені шари;

– жорсткі поруваті фільтри, в яких зерна міцно пов'язані одне з одним спіканням, пресуванням, склеюванням (порувата кераміка, поруваті метали, поруваті пластмаси).

В теперішній час зернуваті фільтри не є широкопоширеними внаслідок складності експлуатації.

Залежно від виду вловлюваного пилю зернуваті фільтри можуть мати наступні параметри:

- ступінь очистки 95–99,5 %;
- гідравлічний опір 1 300–3 000 Па;
- швидкість фільтрації 15–35 м/хв.

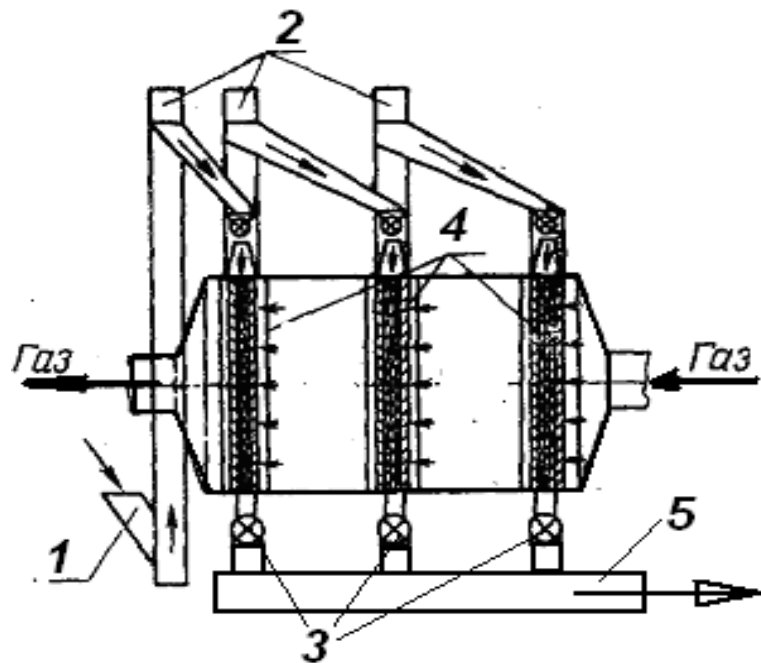


Рисунок 3.13 – Фільтр із рухомими шарами з зернуватого матеріалу:
1 – короб для подавання свіжого зернуватого матеріалу; 2 – живильники;
3 – затвори; 4 – фільтруючі шари; 5 – короб для відведення запиленого матеріалу

3.3.5 Електрофільтри

Фізичні основи електричної очистки газів

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 з різко неоднорідним полем.

Схема процесу електричної фільтрації газів наведена на рисунку 3.14.

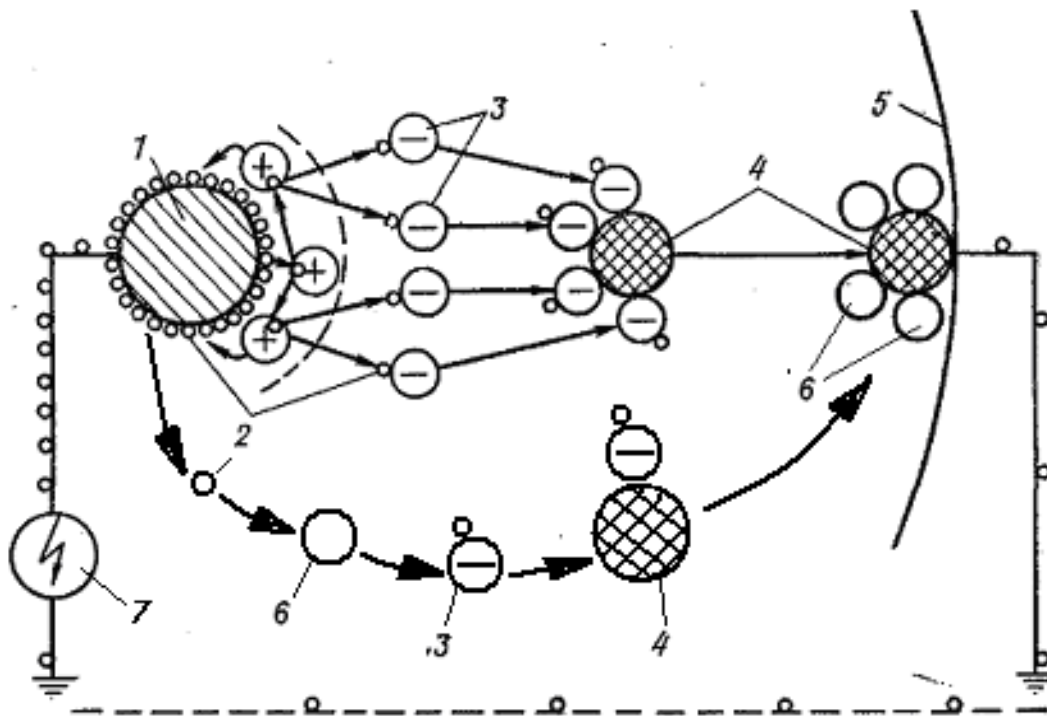


Рисунок 3.14 – Механізм зарядження й осадження часток в електрофільтрі:

- 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 по мірі зменшення напруженості електричного поля в напрямку осаджувального електрода.

Газові іони різної полярності, що утворюються в зоні корони, під дією сил електричного поля рухаються до різнойменних електродів. Внаслідок цього

в міжелектродному проміжку виникає електричний струм, що має назву «струм 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 частка часток осаджується на розвиненій поверхні осаджувальних електродів. По мірі накопичення на електродах осаджені частки видаляються струшуванням або промиванням електродів водою.

Коронний розряд виникає при досягненні певної напруженості електричного поля, що має назву початкової або критичної напруги. Наприклад, критична напруга для повітря при атмосферному тиску та температурі 20 °С складає близько 15 кВ/см.

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

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

Критична напруга коронного розряду для системи, що складається з трубчатого осаджувального електроду та гладкого дротяного коронуючого електроду, визначається формулою

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

де U_0 – критична напруга, В;

E_0 – критична напруга електричного поля, В/м;

R_1 – радіус коронуючого електроду, м;

R_2 – радіус трубчатого осаджувального електроду, м.

З наведеної формули U_0 випливає, що зі зменшенням радіусу коронуючого електроду 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 знаходиться в межах 20–40 кВ.

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, в тому числі від:

- полярності прикладеної до електродів різниці потенціалів;
- конструктивні параметри (геометричні характеристики електродів);
- технологічні параметри газу;
- кількість завислих часток, що містяться в газі, та їх властивості.

Приклади вольт-амперних характеристик електрофільтрів наведені на рисунку 3.15.

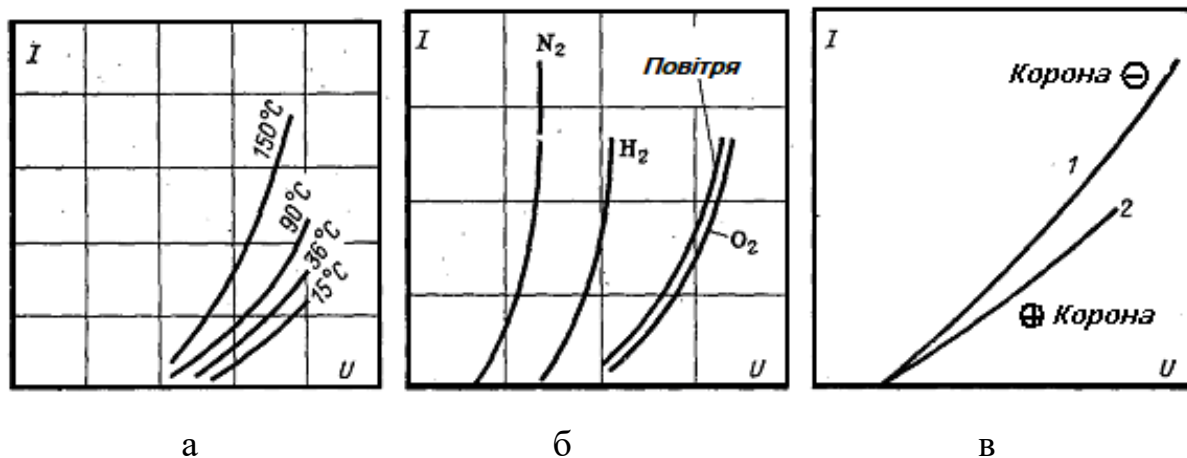


Рисунок 3.15 – Характер залежності вольт-амперних характеристик електрофільтрів:

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

Для електричної очистки газів використовується, як правило, 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.

Призначення, характеристика, будова та класифікація електрофільтрів

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 досягає 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 розміром 0,1–100 мкм та менше;
- можливість очистки газів з 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 відносяться:

- 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.

Установка для електричного очищення газів складається з електрофільтра, агрегатів живлення та систем транспортування вловленого пилю.

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 електрофільтру встановлюються спеціальні пристрої для збору пилю – бункери та її видалення (рис. 3.16).

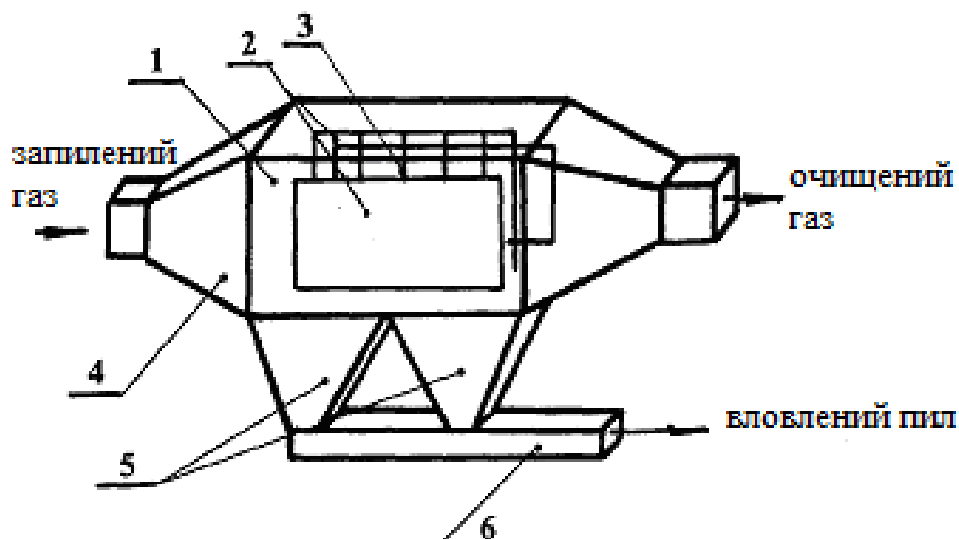


Рисунок 3.16 – Електрофільтр:

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

Електрофільтри можна класифікувати за наступними 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. В сухих електрофільтрах тверді частки видаляються з електродів струшуванням. Струшування осаджувальних електродів може виконуватись декількома способами: співударяння, ударно-молоткове струшування, використання ударно-імпульсних систем і вібраційних механізмів. Головний недолік методу струшування – прискорене втомне зношування конструкцій електрофільтра. Очищений газ в 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. В мокрих електрофільтрах вловлені частки змивають з електродів водою. Періодичне промивання передбачає короткочасне подавання великої кількості рідини для промивки в активну зону при одночасному відключення електрофільтру від живлення. Безперервне промивання здійснюється безперервним подаванням рідини для промивання на працюючі електроди. Кількість рідини при цьому дорівнює мінімально необхідному для утворення суцільної водяної плівки для змивання осаджуваного пилу. Температура газів, що надходять до мокрого електрофільтру повинна бути близько до точки роси. Апарати можуть використовуватись для вловлювання туману або крапельної вологи з газового потоку;

3) за напрямком руху газу в електрофільтрі:

- вертикальні;
- горизонтальні;

4) за кількістю послідовно встановлених полів:

- однопольні;
- багатопольні.

Найбільш поширеним типом електрофільтра є багатопольний горизонтальний фільтр. Наявність декількох послідовно встановлених полів покращує умови вловлювання часток із-за можливості диференціації

електричного режиму та забезпечення можливості почергового струшування за полями.

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

Системи осаджувальних електродів виконують двох типів:

- з пластинчатими електродами;
- з трубчатими електродами.

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

Конструкція електроду разом із високими електричними показниками повинна забезпечувати мінімальний вторинний винос та мати достатню механічну міцність. Це необхідно для надійної роботи апарату в умовах підвищених температур та сильних вібрацій. Один з основних недоліків плоских електродів – різке підвищення вторинного виносу при збільшенні швидкості більш за 1 м/с. Тому плоскі осаджувальні електроди в сухих електрофільтрах використовують при швидкості газу не більш ніж 0,6–0,8 м/с.

Пластинчаті електроди можуть бути листові, пруткові, перфоровані, з профільованих елементів (рис. 3.17).

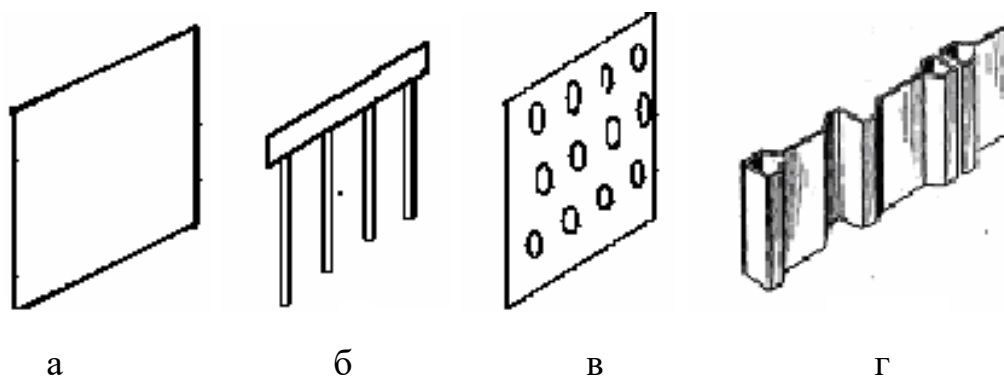


Рисунок 3.17 – Пластинчаті електроди:

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

Трубчасті електроди можуть бути зроблені зі спеціальних труб круглого перерізу або шестигранні стільникові (рис. 3.18).

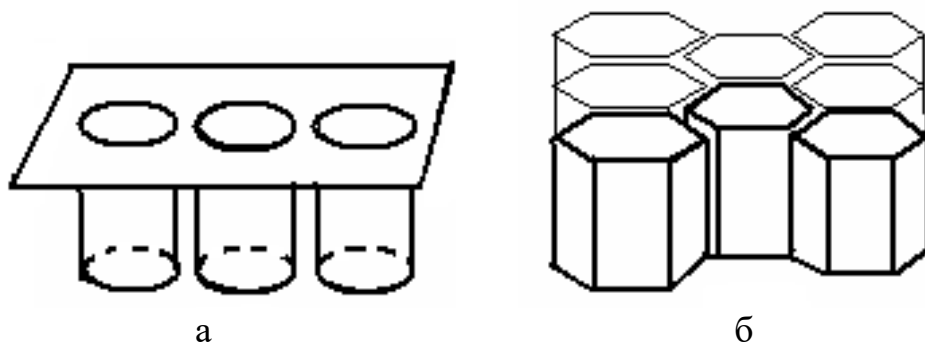


Рисунок 3.18 – Види трубчастих електродів:
а – труба; б – шестигранний стільниковий

Коронуючі електроди можуть бути рамкові, вільно підвішені, жорсткі та нежорсткі з нефіксованими (гладкі) та з фіксованими точками розряду (рис. 3.19).

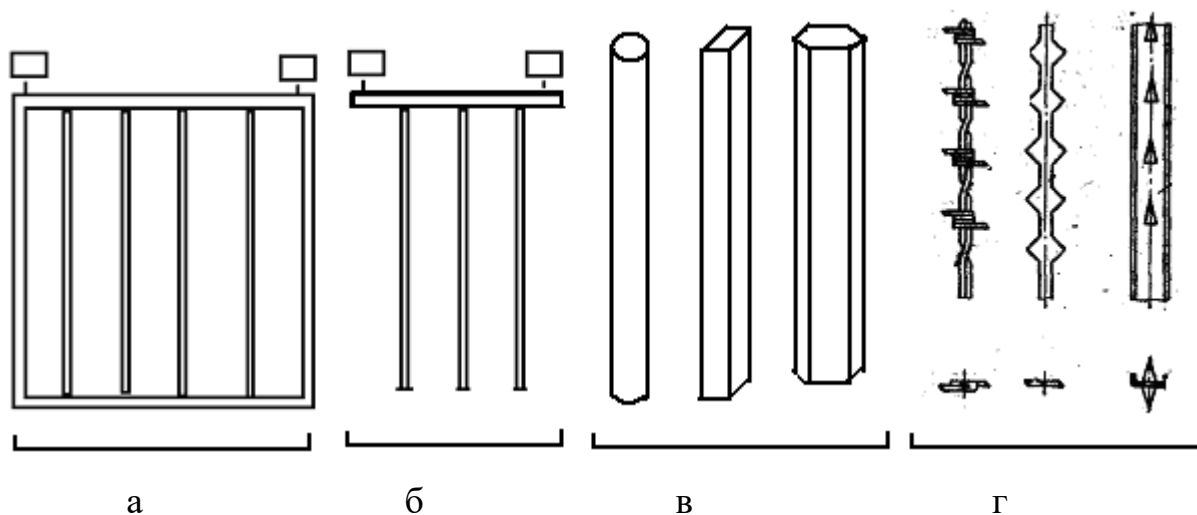


Рисунок 3.19 – Коронуючі електроди:
а – рамкові; б – вільно підвішені; в – з нефіксованими точками розряду;
г – з фіксованими точками розряду

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 коронуєчої системи і одночасно вони виконують роль несучих конструкцій. В електрофільтрах використовують кварцові, порцелянові, паперово-бакелітові, ситалові (ситали – закристалзоване скло) ізолятори.

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

Розрахунок ефективності електрофільтра

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

В мокрих електрофільтрах при досягненні частками електродів процес вловлювання можна вважати закінченим. Змочені частки прилипають до електродів і змиваються водою, віддаючи їм свій заряд внаслідок гарної провідності. В 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:

$$\eta_n = 1 - e^{-\frac{2\omega L}{WR}} \quad \text{– для трубчатого електрофільтра;}$$

$$\eta_n = 1 - e^{-\frac{\omega L}{WH}} \quad \text{– для пластинчатого електрофільтра,}$$

де w – швидкість дрейфу часток, м/с;

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

L – активна зона електрофільтра, м;

R – радіус трубчатого осаджувального електроду, м;

H – відстань між коронуючим електродом та платинчатим осаджувальним електродом.

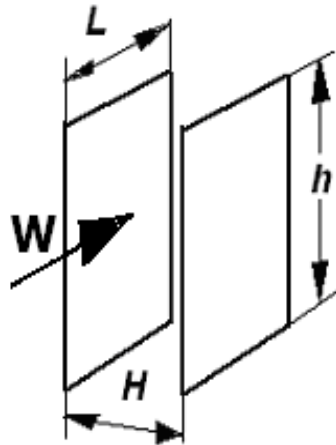


Рисунок 3.20 – Схема осаджувальних електродів електрофільтра

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 до формули парціальної ефективності пластинчатого 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 електроду, тобто швидкість дрейфу.

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

$$w = 0.118 \cdot 10^{-10} \frac{E^2 r_q}{\mu}.$$

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:

$$w = 0.17 \cdot 10^{-11} \frac{E \cdot C_k}{\mu},$$

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 знаходиться в межах 0,815–1,63.

Варто зазначити, що теоретичний розрахунок ступеню очистки є низьконадійним. На практиці формулу η_n використовують у тих випадках, коли є досвід експлуатації аналогічного електрофільтра в аналогічних умовах. Виходячи з фактичного значення η , в фільтрі-аналозі знаходять w та використовують її 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.

Фактори впливу на ефективність очистки електрофільтра

Факторами, що впливають на ефективність роботи електрофільтра є:

1) швидкість газу в активному перерізі апарату.

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

З формули Дейча випливає, що для забезпечення необхідного ступеню 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 в першу чергу 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 в 8–10 разів. Тому для фільтрів з плоскими осаджувальними електродами швидкість газу приймається зазвичай у межах до 0,8–1 м/с. В сухих електрофільтрах профільованими електродами верхня межа швидкості газу зазвичай не перевищує 1,5–1,7 м/с;

2) електричні параметри електрофільтра.

Визначальним з них є напруженість електричного поля E . Згідно формулі 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 :

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

Найкращі 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».

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

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

$$i_o = i_i + i_n,$$

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

Внаслідок малої швидкості рух часток пилу складова струму i_n в нормально працюючому електрофільтрі не перевищує 1–2% від загального струму. З підвищенням 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 у випадку, коли об'ємний заряд часток пилу стає рівним об'ємному заряду генеруємих 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 багатопольних електрофільтрів;

4) питомий електричний опір пилу (ρ_v) – чинить істотний вплив на процес осадження та видалення пилу з електрофільтра.

За розміром питомого електричного опору пил поділяється на три групи:

- низькоомний пил ($\rho_v < 10^2\text{ Ом}\cdot\text{см}$);

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

Нормальний процес осадження та видалення з електродів є характерним 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 аутогезійних сил. Розмір агломератів забезпечує попадання в бункер значної частки пилу при струшуванні та незначний вторинний винос.

Низькоомний пил миттєво розряджається, попадаючи на електрод. Пилінки не агломеруються за рахунок аутогезійних сил і більша частина осадженого пилу знову уноситься газовим потоком.

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

5) властивості очищуваного газу.

На процес очистки в електрофільтрах впливають наступні параметри:

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

Вплив температури очищуваного 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. 3.21).

Значення пробивної напруги зростає зі збільшенням щільності газу, тому при зниженні температури пробивна напруга збільшується, забезпечуючи

стійку роботу електрофільтра при більш високій напрузі.

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

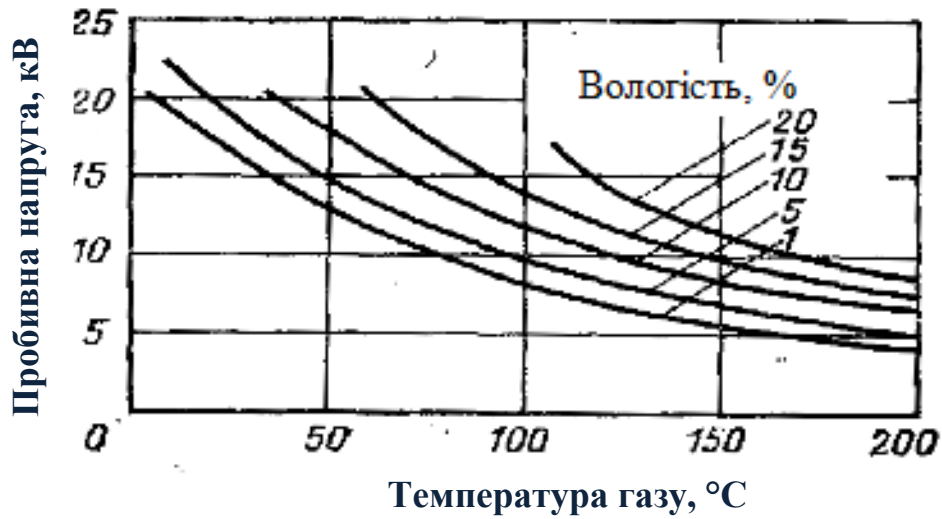


Рисунок 3.21 – Залежність пробивної напруги від температури та вологості газу

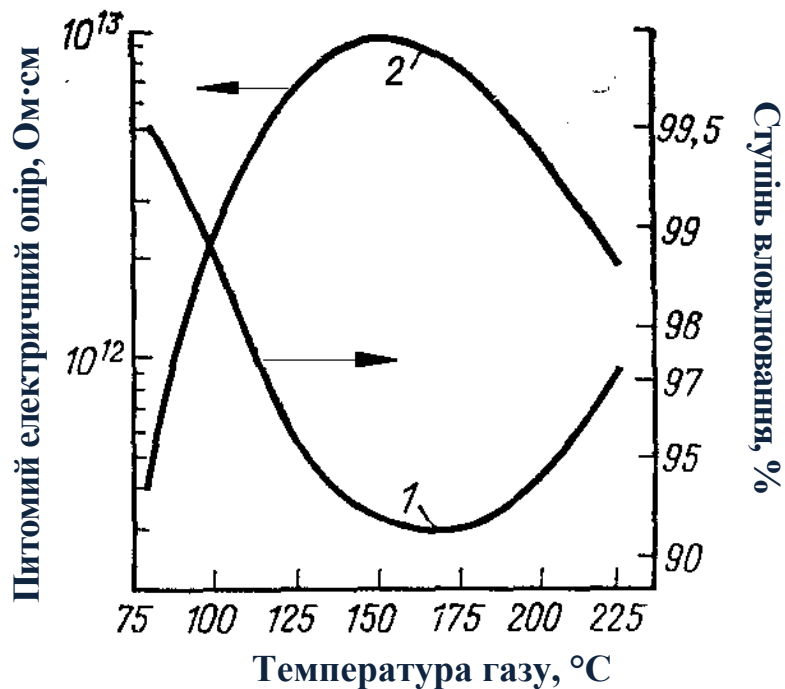


Рисунок 3.22 – Залежність питомого електричного опору та ступеня очистки від температури газу

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

Електричне обладнання електрофільтрів

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

Для підвищення напруги в електроагрегатах використовують спеціальні, головним чином однофазні трансформатори. Умови роботи електрофільтрів висувають особливі умови до конструкції трансформатора – можливість довготривало витримувати електродинамічні перенавантаження, що виникають при пробоях в електрофільтрах.

У зв'язку з неперервною зміною температури, вологості, запиленості та інших параметрів газового потоку електричний режим електрофільтрів безперервно змінюється. Незначне зниження робочою напруги (на 1 %) призводить до суттєвого зниження струму корони (на 5%), внаслідок 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 наступними методами:

– підтриманням напруги на межі дугового пробою – напруга на електродах плавно підвищується до виникнення пробою. В момент пробою напруга виключається на 0,5–3 с або різко знижується до значення, що забезпечує гасіння дуги. За час відключення напруга автоматично знижується

на невелике значення таким чином, щоб при повторному включенні не виникало дугового розряду. Далі напруга знов плавно підіймається до настання пробою, після чого знов йде відключення, після чого цикл повторюється. При такому періодичному способі регулювання більшу частину часу електрофільтр працює у безіскровій зоні напруги. В результаті робоча напруга на електродах є нижчою за максимально можливий рівень;

– за заданою кількістю іскрових розрядів – при роботі в зоні іскрових розрядів робоча напруга є близькою до максимально можливої і відповідно ступінь очистки є найбільш високою. Встановлено, що оптимальна величина напруги визначається кількістю іскрових розрядів на хвилину. Найбільш вигідним є 40–70 іскрових зарядів за хвилину. При більшій кількості іскрових зарядів ефективність роботи електрофільтра знижується із-за збільшення втрат потужності в режимі частих іскрових пробойів. 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 – вищезазначеного недоліку позбавлена екстремальна система регулювання завдяки підтримці максимальної середньої напруги на електродах. Зі збільшенням первинної напруги трансформатора, середнє значення напруги на електродах спочатку лінійно зростає та досягає максимуму, а потім починає зменшуватись за рахунок зростання інтенсивності іскрових розрядів. Максимальна середня напруга на електродах відповідає оптимальній кількості іскрових розрядів в 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 ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ І ОБЛАДНАННЯ МОКРОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

Мокра очистка газів (гідромеханічна очистка, промивка газів, скруберна очистка) – це один з найбільш ефективних і розповсюджених засобів пиловловлювання. У якості зрошуючої рідини найчастіше використовується вода. При вловлюванні в одному апараті одночасно твердих та газоподібних забруднюючих речовин вибір зрошуючої рідини, обумовлений процесом абсорбції.

Мокру очистку використовують у тому випадку, коли припустиме зволоження та охолодження димового газу і розроблені заходи з попередження бризкоуносу і утилізації стоків.

Головні переваги апаратів мокрої очистки газів:

- простота конструкції і відносно невелика вартість;
- більш висока ефективність у порівнянні з сухими апаратами інерційного типу;
- менші габарити у порівнянні з тканинними фільтрами та електрофільтрами;
- можливість використання для очистки високотемпературних та вологих газів;
- можливість використання для очистки горючих та вибухонебезпечних газів;
- можливість уловлювання одночасно твердих, рідких та газоподібних компонентів;
- надійність та довготривале використання, що обумовлені відсутністю рухомих вузлів;
- простота і безпека експлуатації, що обумовлені відсутністю високих напруг складних пристроїв.

Головні недоліки апаратів гідромеханічної очистки газів:

- значні витрати енергії при високих ступенях очистки;
- проблема утворення шламів, їх використання та утилізація вловленого продукту;
- утворення відкладень уловлених часток на внутрішніх поверхнях обладнання при охолодженні газів до температури роси або виносі вологи з пиловловлювача;
- корозійне зношення обладнання і газопроводів з очистки газів, що містять агресивні компоненти;
- негативний вплив крапельної вологи на стінки димових цегляних та залізобетонних труб;
- погіршення умов розсіювання пилу та газів, що викидаються через димові труби.

4.1 Фізичні основи мокрої очистки газів. Розрахунок мокрих пиловловлювачів

На практиці використовують два способи захвату часток пилу рідиною:

- краплями рідини;
- плівкою рідини (один з варіантів – барботаж, тобто проходження газових бульбашок через шар рідини).

4.1.1 Вловлювання часток пилу краплями рідини

Для реалізації процесу очистки газу краплями рідини, запилений газ промивають дисперговою (розпиленою) рідиною. Частки пилу захоплюються краплями рідини і виводяться з газового потоку.

При русі краплі у просторі, що заповнений димовим газом, осадження пилу на краплі відбувається головним чином внаслідок кінематичної коагуляції, яка обумовлена рухом крапель рідини і часток пилу з різними

швидкостями.

Крім того, в процесі очистки газів можуть бути використані наступні види (механізми) коагуляції:

- теплова (броунівська дифузія) – головним чином для часток пилу розміром менш за 1 мкм;
- градієнтна – відбувається у потоках при наявності поперечного градієнту швидкості;
- турбулентна – обумовлена турбулентними пульсаціями у потоці запиленого газу.

Розглянемо рух краплі у потоці запиленого газу (рис.4.1) . Краплю будемо вважати сферичною.

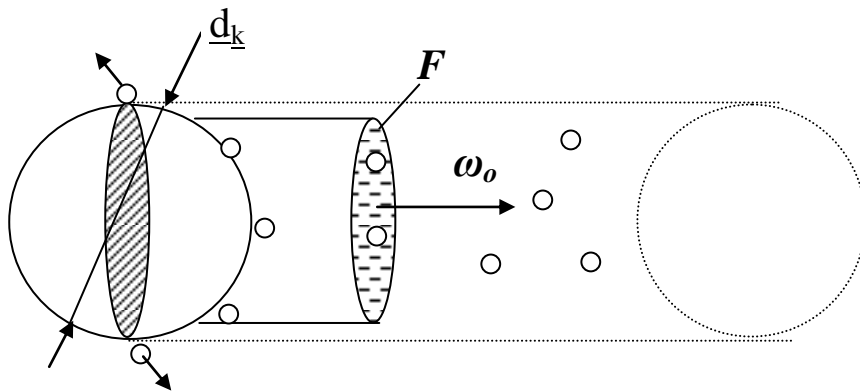


Рисунок 4.1 – Схема руху краплі рідини у запиленому потоці газу

Кількість часток, що вловлюється за одиницю часу однією краплею, визначають за формулою (од/с):

$$N_t = \eta_z \frac{\pi d_k^2}{4} \omega_o z,$$

де η_z – коефіцієнт захвату – відношення площі перерізу очищеного краплею потоку до площі поперечного перерізу краплі;

d_k – діаметр краплі води, м;

ω_o – швидкість руху краплі відносно часток пилу, м/с;

z – запиленість газу, од/м³.

Головним параметром, що визначає інерційне осадження, є критерій Стокса (Stk), який визначається за формулою:

$$Stk = \frac{d_u^2 \omega_o \rho_u c}{18 \mu d_k};$$

де d_u – діаметр часток пилу, м;

ρ_u – щільність часток пилу, кг/м³;

μ – динамічна в'язкість газу, Нс/м²;

c – поправка Кенингема.

Коефіцієнт захоплення η_z є функцією критерію Стокса ($\eta_z = f(Stk)$) і задається за допомогою різних емпіричних формул.

Визначення маси пилу m_p , що буде вловлено за певний проміжок часу, виконують на підставі наступних розрахунків:

1) визначимо N – кількість часток, які будуть вловлені за одиницю часу при розпилюванні об'єму води Q_B ;

2) крапля займає об'єм, який дорівнює V_K і визначається за формулою (м³):

$$V_K = \frac{\pi \cdot d_k^3}{6};$$

3) розпилений обсяг води Q_B (м³/с) містить n_K крапель визначається за формулою (од/с):

$$n_K = \frac{6 \cdot Q_B}{\pi \cdot d_k^3};$$

4) кількість часток, що вловлюються за одиницю часу при розпиленні об'єму води Q_B визначається за формулою (од/с):

$$N = \eta_z \cdot \frac{\pi d_k^2}{4} \cdot \omega_o \cdot Z \cdot \frac{6 Q_B}{\pi d_k^3} = \frac{3 \omega_o Z Q_B}{2 d_k};$$

5) маса однієї частки m_u дорівнює (кг):

$$m_u = \rho_u \cdot \frac{\pi d_u^3}{6};$$

б) рахункова концентрація пилу Z , виражена за допомогою масової концентрації C , визначається за формулою (од/м³):

$$Z = \frac{6C}{\rho_{\text{ч}} \pi \cdot d_{\text{ч}}^3};$$

7) сумарна (m_n) маса часток пилу N , що вловлена за одиницю часу при розпилюванні води Q_6 дорівнює (кг/с):

$$m_n = N \cdot \rho_{\text{ч}} \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6};$$

8) підставляючи формули N і Z у формулу m_n отримаємо масу пилу m_n , що вловлюється за одиницю часу (кг/с):

$$m_n = \frac{3\eta_3 \omega_0 C Q_6}{2d_k}.$$

Таким чином, кількість вловленого пилу прямо пропорційна відносній швидкості руху краплі, витраті зрошуючої рідини і концентрації пилу і зворотно пропорційна діаметру крапель рідини.

Ця модель розрахована для крапель сферичної форми одного розміру (незмінного з часом), що рухаються відносно часток пилу з постійною швидкістю і рівномірно розподілені по перерізу апарату.

Через складність розрахунків часто для визначення ступеню очистки газів η використовують емпіричну залежність

$$\eta = 1 - \exp(-k m Stk^{0.5}),$$

де k – константа;

m – питома витрата рідини, м³/м³.

4.1.2 Вловлювання часток на плівці рідини. Барботаж

Осадження пилу на плівку рідини здійснюється при направленні потоку часток пилу:

- на поверхню рідини;
- на змочену рідиною стінку;

– на плівку спеціально отриманих газових бульбашок (барботаж).

Схема захвату частки плівкою рідини показана на рис. 4.2.

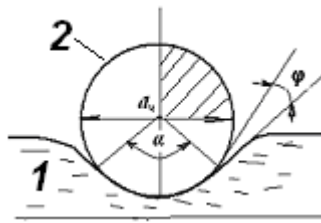


Рисунок 4.2 – Схема захвату часток плівкою рідини:

1 – плівка рідини; 2 – частка пилу; φ – крайовий кут змочування

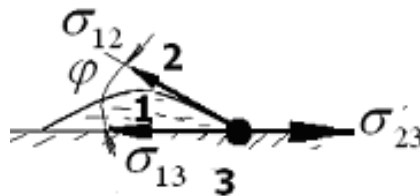


Рисунок 4.3 – Схема визначення крайового кута змочування:

1 – крапля рідини; 2 – газове середовище; 3 – тверда поверхня;

φ – крайовий кут змочування

Частка утримується на поверхні плівки силою адгезії, яка визначається за формулою :

$$P_{ад} = \frac{2\pi\sigma d_u}{1 + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \cos \varphi,$$

де α – кут, що визначає змочену частину поверхні частки пилу;

φ – крайовий кут змочування, який залежить від фізико-хімічних властивостей і дисперсного складу пилу;

σ – поверхневе натягнення, н/м.

Крайовий кут змочування визначають за формулою:

$$\cos \varphi = \frac{\sigma_{23} - \sigma_{13}}{\sigma_{12}},$$

де $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$ – поверхнєве натяжіння на межі «рідина – газ», «рідина – тверда поверхня», «тверда поверхня – газ» відповідно, Н/м.

Для рідин, що добре змочують ($\varphi \approx 0$) і при крапковому контакті ($\alpha \approx 0$) розмір сили адгезії визначається за формулою:

$$P_{ad} = 2 \pi \sigma d_c.$$

Для плівки мінеральної олії $P_{ad}=157d$, (для твердої поверхні $P_{ad} = 0,012d$). Сила адгезії на плівці рідини (олії) у багато разів більша, ніж на сухій поверхні.

Змочуваність матеріалів погіршується зі зменшенням розмірів часток. Тому у техніці пиловловлювання часто доводиться мати справу з гідрофобними частками.

Для вловлювання на плівку рідини гідрофобних часток (незмочуємих) необхідно, щоб їх кінетична енергія перевищувала роботу з занурення часток у рідину, тобто роботу з подолання сил поверхневого натяжіння.

Гранична швидкість W удару частки, що забезпечує її занурення у рідину, визначається за формулою:

$$W = \frac{1}{\cos \psi} \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho d}},$$

де ψ – кут між напрямком руху частки і нормаллю до поверхні рідини у точці удару.

При $\psi = 0$, тобто при русі частки за нормаллю до поверхні рідини

$$W = 2,83 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho d}}.$$

При великих кутах ψ частки рикошетують від поверхні і вловлювання можливе лише за умови високих швидкостей удару.

Вловлювання часток в режимі барботажу є окремим випадком осадження часток на плівку рідини.

При пиловловлюванні в режимі барботажу діють механізми інерційного, гравітаційного та дифузного осадження на поверхні газових бульбашок.

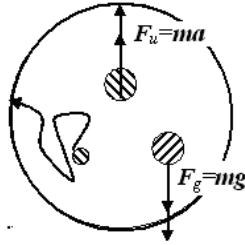


Рисунок 4.4 – Схема осадження часток пилу на поверхні газової бульбашки

Діаметр газових бульбашок складає 2–20 мм. При $d_b > 2\text{--}3$ мм вони втрачають сферичну форму, утворюючи еліпсоїди. Для визначення критичного діаметра бульбашки d_b^{kp} існує емпірична формула:

$$d_b^{kp} = \frac{2}{V_b^2} \frac{\sqrt[3]{3/\beta}}{\sqrt[3]{\rho_2/\rho_{жс}}} \sigma,$$

де β – коефіцієнт, що визначається експериментально;

V_b – швидкість підйому бульбашки, ($V_b = 0,28\text{--}0,4$ м/с).

При інерційному (за рахунок відцентрових сил) осадженні кількість часток, що осаджуються на бульбашці, становить: $N = (1/4)\pi D^2 Z V_b$, 1/с.

4.1.3 Ефективність апаратів мокрого очищення газів.

Енергетичний метод розрахунку

Ефективність роботи мокрих пиловловлювачів визначається витратами енергії на процес очистки газу. При цьому враховується як енергія, що витрачається на рух газу через пиловловлювач, так і енергія, що витрачена на подачу та диспергування рідини.

Енергетичним параметром є сумарна енергія контакту K_u – витрата енергії на обробку одиниці об'єму газу в одиницю часу, що розраховується за формулою:

$$K_u = \Delta P_{an} + P_e \frac{Q_6}{Q_2} + \frac{N_m}{Q_2}, \text{кДж} / 1000 \text{м}^3,$$

де ΔP_{an} – гідравлічний опір апарату, Па;

P_6 – тиск розпилюємої рідини на вході до апарату, Па;

N_m – потужність обертаючого механізму, що витрачається на контактування газів з рідиною, Вт;

Q_6, Q_2 – об’ємні витрати рідини і газу на вході до апарату, м³/с.

Значення кожної складової формули залежить від типу апарату.

Залежність між ступенем очистки і витратами енергії визначається за формулою:

$$\eta = 1 - \exp(-BK_q^x),$$

де: B та x – константи, що залежать від фізико-хімічних властивостей і дисперсного складу пилу і визначаються експериментально (наведено у табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Значення показників B та X

Вид пилу	B	X
Пил вагранок	$1,355 \times 10^{-2}$	0,621 0
Пил доменної печі	$6,61 \times 10^{-2}$	0,891
Пил вапневої печі	$6,5 \times 10^{-4}$	1,052 9
Пил мартенівських печей, що працюють на кисневому дутті	$1,565 \times 10^{-6}$	1,619
Пил мартенівських печей, що працюють на повітряному дутті	$1,74 \times 10^{-6}$	1,594
Зола димових газів ТЕС	$4,34 \times 10^{-3}$	0,3

Показник η при високих значеннях ступеню пиловловлювання мало характеризує якість очищення, тому часто використовують показник кількості одиниць переносу N_q , який є аналогічним параметру, що використовується в технологічних процесах, пов’язаних з масоперенесенням, і визначається за формулою:

$$N_q = \ln \left[\frac{1}{1 - \eta} \right], \quad \text{тоді } N_q = BK_q^x.$$

Можливість використання енергетичного методу розрахунку для різноманітних типів мокрих пиловловлювачів пояснюється тим, що в основі вловлювання завислих часток знаходиться один і той ж механізм – інерційне осадження. При посиленні впливу інших механізмів (наприклад, дифузійного) спостерігаються значні відхилення від енергетичної залежності.

4.1.4 Тепло- й масообмін в мокрих пиловловлювачах

В мокрих пиловловлювачах одночасно з пиловловлюванням, як правило, йдуть процеси тепло- й масообміну. Це є наслідком різниці температур газу і рідини, різниці парціального тиску пари в газі P_2 і над рідиною $P_{ж}$. Ці процеси можуть здійснюватися як з випаровуванням води (випарне), так і з конденсацією (конденсаційне) охолодження водяної пари, що міститься у газі.

Випарне охолодження відбувається при взаємодії гарячого сухого або ненасиченого вологою газу з підігрітою водою. При охолодженні газу одночасно відбувається збільшення його вологомісткості.

Конденсаційне охолодження відбувається у випадку, коли гарячий газ, насичений водяною парою, зустрічається з холодною водою.

Розглянемо процеси тепло- й масообміну краплини рідини, що знаходиться у гарячому газі.

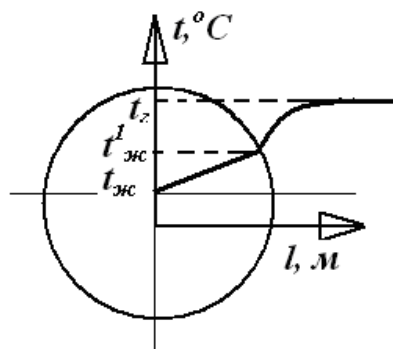


Рисунок 4.5– Схема розподілу температур у краплині рідини:

t_r – температура газу; $t_{ж}^1$ – температура поверхні краплі рідини;

$t_{ж}$ – температура в центрі краплі рідини

Кількість тепла, що передається від газу до рідини, визначається за формулою:

$$q = \alpha (t_2 - t_{жс}^I) F, \text{ Дж/с},$$

де α – коефіцієнт теплової віддачі, що характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла і навколишнім середовищем. Чисельно дорівнює кількості теплоти, відданої одиницею поверхні за одиницю часу при різниці температур між поверхнею тіла і навколишнім середовищем в один градус, [Дж/с м² К] ;

t_2 – температура газу на достатній віддаленості від краплі;

$t_{жс}^I$ – температура поверхні краплі рідини;

F – площа поверхні краплі;

α – визначаються експериментально, окремо для кожної рідини і конкретних умов теплообміну. Для приблизного розрахунку використовують метод теорії подібності.

Кількість тепла, що отримує крапля рідини при нагріванні її на Δt , визначається за формулою:

$$q = C_k m_k \Delta t,$$

де C_k – теплоємність рідини, Дж/кг °С;

m_k – маса краплини, кг.

Кількість тепла, що отримує крапля рідини при нагріванні краплі до температури кипіння, її випаровуванні і нагріванні до температури t_{n2} :

$$q = C_k m_k (t_{кин} - t_{к1}) + r m_k + C_n m_k (t_{n2} - t_{кин}),$$

де $t_{кин}$ – температура кипіння рідини;

$t_{к1}$ – початкова температура краплі;

r – прихована теплота пароутворення;

C_n – теплоємність пари;

t_{n2} – кінцева температура пари.

Використовуючи поняття ентальпії:

$$q = m_k (i_{п2} - i_{к1}),$$

де i_{n2} – ентальпія водяної пари при кінцевій температурі;

$i_{к1}$ – ентальпія води при початковій температурі.

За аналогією з рівнянням теплообміну запишемо рівняння масообміну:

$$\Delta M = \beta F (P_{к} - P_{з}), \text{ кг/с},$$

де β – коефіцієнт масообміну – кількість речовини, яке віддає одиниця поверхні в одиницю часу при градієнті тиску в 1 Па, $\text{кг/м}^2 \text{ с Па}$;

$P_{з}, P_{к}$ – парціальний тиск пари в газі на віддаленні від краплі та на її поверхні.

Розрахунок процесів тепло- й масообміну (ТМО) і досвід експлуатації апаратів мокрої очистки газів показують, що:

– у більшості апаратів процеси ТМО йдуть настільки інтенсивно, що парогазокрапельну суміш на виході з них можна з достатньою точністю вважати термодинамічно рівноважною;

– витрати тепла у навколишнє середовище через стінки апарата можна не брати до уваги.

В цих умовах для визначення параметрів газу і рідини на виході з апарату газоочистки можна скористатися законом збереження енергії в формі теплового балансу: кількість тепла, що вноситься до газоочистки з газом, зрошуючою рідиною і водяною парою дорівнює кількості тепла, що виноситься з апарату з газом, відходящою рідиною і водяною парою

$$q_{сг1} + q_{нг1} + q_{в1} = q_{сг2} + q_{нг2} + q_{в2},$$

де $q_{сг1}$ – кількість тепла, що вноситься сухим газом в газоочистку:

$$q_{сг1} = C_{pg} G_2 t_{г1},$$

де C_{pg} – теплоємність димового газу, $\text{Дж/кг}^\circ\text{С}$;

$q_{нг1}$ – кількість тепла, що вноситься в газоочистку з водяною парою, що міститься у газі:

$$q_{нг1} = i_{п1} G_{н1} = i_{п1} G_2 d_1, \text{ Дж/с},$$

де i_n – ентальпія водяної пари;

d_1 – вологомісткість;

$q_{в1}$ – кількість тепла, що вноситься до газоочистки зі зрошуючою рідиною:

$$q_{\text{в}1} = C_{\text{в}} G_{\text{в}1} t_{\text{в}1},$$

де $C_{\text{в}}$ – теплоємність води;

$q_{\text{с}2}$ – кількість тепла, що виноситься з газоочистки з сухим газом:

$$q_{\text{с}2} = C_{\text{п}2} G_2 t_{22},$$

$q_{\text{н}2}$ – кількість тепла, що виноситься з водяною парою, що міститься в газі:

$$q_{\text{н}2} = i_{\text{н}2} G_2 d_2,$$

$q_{\text{в}2}$ – кількість тепла, що виноситься з газоочистки зі зрошуючою водою:

$$q_{\text{в}2} = C_{\text{в}} G_{\text{в}2} t_{\text{в}2}.$$

Виходячи з припущення про термодинамічну рівновагу: температура води на виході з газоочистки дорівнює температурі газу і температурі водяної пари, що міститься в газі:

$$t_{\text{в}2} = t_{22} = t_{\text{н}2} = t_2,$$

Запишемо формулу для ентальпії пари $i_{\text{п}}$:

$$i_{\text{п}} = 2501 + 1,93 t, \text{ кДж/кг}.$$

Теплоємність газу у першому наближенні можна вважати такою, що дорівнює теплоємності повітря, тобто $C_{\text{рг}} \approx C_{\text{рв}} = 1 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{C}$.

Вологість газів може бути визначена так:

$$d = \frac{0.804 \cdot P_{\text{парц}}}{(P - P_{\text{парц}}) \cdot \rho_2}, \frac{\text{кг вп}}{\text{кг сп}}.$$

З урахуванням зазначеного вище, ми маємо рівняння з двома невідомими $G_{\text{в}2}$ та t_2 .

Доповнимо його рівнянням матеріального балансу:

$$G_{\text{в}1} + G_2 d_1 = G_{\text{в}2} + G_2 d_2.$$

Розв'язуючи систему з двох рівнянь з двома невідомими, знаючи параметри газу перед мокрою газоочисткою, визначаємо параметри газу на виході з неї.

4.2 Апарати мокрої очистки газів

4.2.1 Форсункові скрубери

Форсункові скрубери використовуються для вловлювання з газу часток пилу розміром більше за 10–15 мкм, а також для охолодження і зволоження газу.

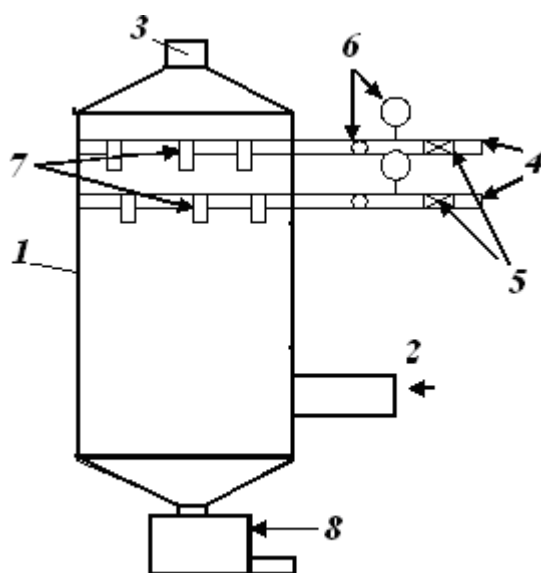


Рисунок 4.6 – Схема форсункового скрубера:

1 – циліндричний корпус; 2 – вхідний патрубок; 3 – вихідний патрубок;
4 – підведення води на зрошення; 5 – регулюючі засувки; 6 – КВП параметрів
води; 7 – форсунки верхнього та нижнього ярусів зрошення; 8 – гідрозатвор

Очистка газу відбувається шляхом інерційного осадження часток пилу на рівномірному потоці дрібнодиспергованих крапель, що рухаються під впливом сили тяжіння вниз.

За напрямом руху газів і рідини скрубери поділяють на противоточні, прямоточні та з перерізним підводом рідини.

Газ, що проходить через скрубера, як правило, охолоджується до 40–50 °С та зволожується до стану насиченості. Швидкість газу в скрубери складає 0,7–1,5 м/с. При збільшенні швидкості починається крапельний винос вологи,

що сприяє утворенню відкладень пилу на внутрішніх поверхнях вихідного патрубку. Питома витрата води складає 1–6 л/м³. Гідравлічний опір – до 250 Па. Максимальний ступінь очистки досягається при $d_k = 0,6–1$ мм.

Ступінь очистки газів визначається за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{C_2}{C_1} = 1 - \exp\left(-\frac{3 \eta_3 \omega_0 H V_{жс}}{2 \omega_k d_k V_2}\right),$$

де η_3 – коефіцієнт захвату;

ω_0 – відносна швидкість крапель і пилу;

H – активна висота скрубера (приймають $H = 2,5D$);

ω_k – швидкість руху крапель;

d_k – діаметр крапель;

$V_{жс}/V_2$ – питома витрата води, л/м³.

Швидкість осадження крапель визначається за формулою:

$$\omega_k = \sqrt[2]{\frac{4 \Delta \rho g d_k}{3 C_x \rho_2}}.$$

Залежно від величини критерію Рейнольдса, C_x визначається за такими формулами:

$$\text{при } Re \leq 1 \quad C_x = \frac{24}{Re};$$

$$\text{при } Re \leq 5 \quad C_x = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{3}{16} Re\right);$$

$$\text{при } Re \leq 400 \quad C_x = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{Re^{0.667}}{16}\right).$$

Коефіцієнт захвату η_3 дорівнює:

$$\eta_3 = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,35)^2},$$

де Stk – критерій Стокса

$$Stk = \frac{d_c^2 \rho_c \omega_0 C}{18 \mu d_k},$$

де C – поправка Кенінгема ($C=1$ при $d_c > 10$ мкм).

Для скрубера за умови $V_{жк}/V_c = 2$ л/м³ коефіцієнт захвату дорівнює:

$$\eta_z = 1 - 0,15 Stk^{-1,24}.$$

4.2.2 Механічні та динамічні газопромивачі

Особливістю механічних газопромивачів є наявність пристрою, що обертається (ротор, диск), який забезпечує розбризування та перемішування рідини з газовим потоком.

Механічні газопромивачі поділяються на дві групи механічні скрубери та динамічні газопромивачі.

У механічних скруберах газ, що очищується, контактує з рідиною, що розбризується, за допомогою тіла, що обертається.

У динамічних газопромивачах для обертання газового потоку і перемішування його з рідиною використовується крильчатка.

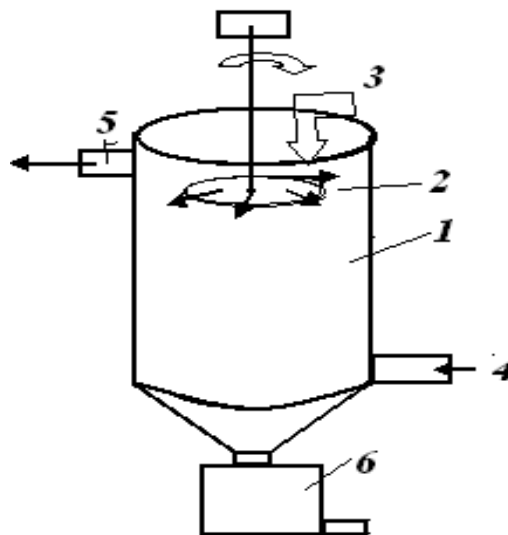


Рисунок 4.7 – Схема механічного скрубера:

- 1 – корпус; 2 – диск, що обертається; 3 – підведення води; 4 – вхід газу;
5 – вихід газу; 6 – гідрозатвор

Дезинтегратор – це мокрий пиловловлювач-вентилятор, що складається зі статора (7–10) і ротора (1–6), кожен з яких обладнаний лопатками. Через сопла корпусу всередину вприскується рідина. Газовий потік, що рухається в міжлопатковому просторі зі швидкістю до 90 м/с, забезпечує подрібнення рідини на дрібні краплі і гарний контакт вловлюємих з газу часток з рідиною.

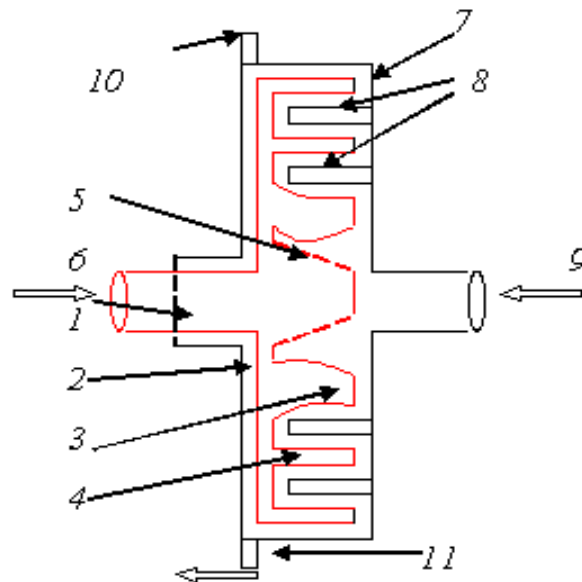


Рисунок 4.8 – Схема дезінтегратора:

- 1 – вал, що обертається; 2 – круглий диск; 3 – лопатки ротора; 4 – стрижні;
 5 – конус з отворами для розбризкування води; 6 – патрубок підводу води;
 7 – равликopodobний корпус; 8 – нерухомі стрижні; 9 – патрубок входу газу;
 10 – відведення газу; 11 – відведення шлама

Параметри, що досягаються у дезінтеграторі:

- продуктивність – до 80 000 м³/год;
- напір, що розвивається – до 5 кПа;
- витрата води – 0,5–1,5 л/м³;
- питома витрата електроенергії – 18–22 МДж/1 000м³;
- температура очищуваних газів – до 60 °С;
- початкова запиленість – до 2 г/м³;
- запиленість очищеного газу на виході – 30–50 мг/м³;

– ступінь очистки $\eta = 70\%$ при $d_{ch} = 0,5$ мкм; $\eta = 90-95\%$; при $d_{ch} = 1,0$ мкм.

Гази після дезінтегратора містять краплі і туман, тому повинні бути пропущені через краплевловлювач.

4.2.3 Скрубери Вентурі

Скрубери Вентурі використовуються для очистки газів від дрібнодисперсного пилю, їх охолодження та зволоження. При використанні в якості зрошуючої рідини хімічних реагентів, скрубери Вентурі може бути використаний для вловлювання газоподібних домішок.

Скрубери Вентурі складаються з труби Вентурі та краплевловлювача.

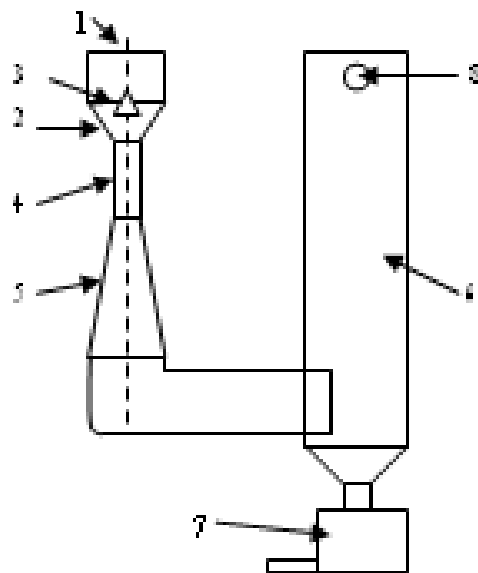


Рисунок 4.9 – Схема скрубера Вентурі:

1 – вхідний патрубок; 2 – конфузор; 3 – зрошуючий пристрій; 4 – горловина;

5 – дифузор; 6 – корпус краплевловлювача; 7 – гідрозатвор; 8 – вихідний

патрубок

Робота скрубера Вентурі заснована на подрібненні води турбулентним газовим потоком, захваті краплинами води часток пилю, подальшій їх коагуляції і осадження в краплевловлювачі інерційного типу.

В конфузори відбувається збільшення швидкості газу, вприскування та подрібнення рідини. В горловині за рахунок різниці швидкостей краплі і частки пилу відбувається осадження часток пилу на краплинах рідини. В дифузори за рахунок зниження швидкості відновлюється частина тиску, що був витрачений на створення високої швидкості газу в горловині. В краплевловлювачі під дією відцентрових сил відбувається сепарація крапель рідини, осадження їх на стінку і відведення рідини у вигляді шламу через гідрозатвор.

Процес очистки більш інтенсивно проходить в кінці конфузору і на початку горловини, де різниця швидкостей ($\omega_z - \omega_k$) є найбільш значною.

Параметри, що досягаються в трубці Вентурі:

- ступінь очищення газів 96–99 %;
- максимальна запиленість газу, що очищується – до 100 г/м³;
- розмір часток пилу, що вловлюється – до 0,2–0,1 мкм;
- швидкість газу в горловині 100–170 м/с;
- питома витрата води 0,5–1,5 л/м³;
- перепад тиску на трубці Вентурі – до 20–30 кПа (200–2 000 мм.рт.ст).

Висока інтенсивність процесів подрібнення і коагуляції крапель, тепло- та мосообміну між краплями, газом і частками пилу, нестационарність і неоднорідність процесу не дозволяє створити надійну теорію розрахунку цього апарату. Практичні розрахунки виконуються з використанням методів теорії подібності і емпіричних залежностей.

Розрахунок процесу подрібнення крапель

При введенні рідини до труби Вентурі відбувається подрібнення крапель за рахунок енергії турбулентного потоку. Найбільш точною формулою для визначення середнього діаметру краплі при розпилюванні рідини пневмофорсункою є формула, що була запропонована японськими вченими (Нукіяма і Таназава):

$$d_k = \frac{0,585\sqrt{\sigma}}{\omega_0\sqrt{\rho_{ж}}} + 53,4 \left(\frac{\mu_{ж}}{\sqrt{\rho_{ж}\sigma}} \right)^{0,45} \left(\frac{Q_{ж}}{Q_г} \right)^{1,5},$$

де ω_0 – відносна швидкість крапель, м/с;

$Q_{ж}/Q_г$ – відношення витрати рідини до витрати газу, м³/м³;

σ – поверхнєве натяжіння, Н/м.

При швидкості газу в горловині вище за 60 м/с точність формули є високою. Похибка стає значною при швидкості менш за 30 м/с.

Межу стійкості краплі можна визначити за чисельним значенням критерію Вебера (W_e):

$$W_e = \frac{\rho_г \omega_0^2 d_k}{\sigma}.$$

При $W_e > W_e^{kp}$ крапля втрачає стійкість і починає подрібнюватись

$$W_e^{kp} = 5-12.$$

Визначення гідравлічного опору

Втрата тиску в трубі Вентурі залежить від швидкості газу в горловині і питомої витрати води і визначається за формулою:

$$\Delta P_{тр} = \Delta P_г + \Delta P_в,$$

де $\Delta P_г$ – частка гідравлічного опору сухої труби Вентурі, обумовлена рухом газу, Па;

$\Delta P_в$ – частка гідравлічного опору, обумовлена введенням зрошуючої рідини, Па;

$$\Delta P_г = \frac{\xi_г \cdot \rho_г \cdot \omega_г^2}{2},$$

де $\xi_г$ – коефіцієнт гідравлічного опору сухої труби Вентурі;

$$\xi_г = 0,165 + 0,034 \times l_г/d_г (0,06 + 0,28 \times l_г/d_г) M,$$

де l_2/d_2 – відношення довжини до діаметру горловини труби Вентурі;

M – число Маха;

$$M = \omega_2 / \omega_{3\theta},$$

де $\omega_{3\theta}$ – швидкість звука в газі, м/с;

$$\omega_{3\theta} = \sqrt{2 \frac{K}{K+1}} \sqrt{\frac{RT}{Mr}},$$

де K – коефіцієнт адіабати, для повітря $K = 1,4$;

$$\Delta P_{\theta} = \frac{\xi_{\theta} \cdot \rho_{\theta} \cdot m \cdot \omega_2^2}{2},$$

де ξ_{θ} – коефіцієнт гідравлічного опору, обумовлений введенням зрошуючої рідини;

ρ_{θ} – густина зрошуючої рідини, кг/м³;

$$m = \frac{Q_{\theta}}{Q_u},$$

$$\xi_{\theta} = 0,63 \cdot \xi_{\Gamma} \cdot m^{-0,3}.$$

Ступінь очистки газу визначається у першому наближенні емпіричним методом. Температура і вологомісткість на виході з труби Вентурі визначаються спільним вирішенням рівнянь теплового і матеріального балансів. Втрати енергії у навколишнє середовище, що не перевищують 2–5%, можна знехтувати. Парогазокрапельну суміш на виході з труби Вентурі можна вважати термодинамічно рівноважною.

Конструкції труб Вентурі

Конструкції труб Вентурі можуть розрізнятися:

- 1) за конфігурацією поперечного перетину: круглі (при малих обсягах очищуємих газів); щільові; кільцеві. При великих витратах газів використовують батарейні або групові компоновки скрубєрів Вентурі;
- 2) за площею поперечного перетину: нерегулюємі та регулюємі.

У промисловості використовують дві конструкції:

- поворотні заслінки для регулювання цільового перетину;
- переміщення вздовж вісі обтікателя для регулювання кільцевого перетину;

3) за розміром гідравлічного тиску:

- високонапірні (для очищення газів від субмікроних часток, ΔP до 30 000 Па);
- низьконапірні (для очищення газів від великодисперсного пилю, охолодження і зволоження газів, $\Delta P = 2\ 000\text{--}5\ 000$ Па);

4) за способом підведення рідини:

- центральне (форсункове) підведення рідини в конфузур;
- периферійне зрошення в конфузурі або горловині;
- плівкове зрошення;
- безфорсункове зрошення (підведення рідини за рахунок енергії газового потоку).

З аеродинамічної точки зору оптимальною є конструкція труби Вентурі з наступними відношеннями розмірів її елементів:

- кут звуження конфузора $\alpha = 25\text{--}28^\circ$;
- кут розкриття дифузора $\beta = 6\text{--}7^\circ$;
- довжина горловини $l_2 = 0,15\text{--}3d_r$.

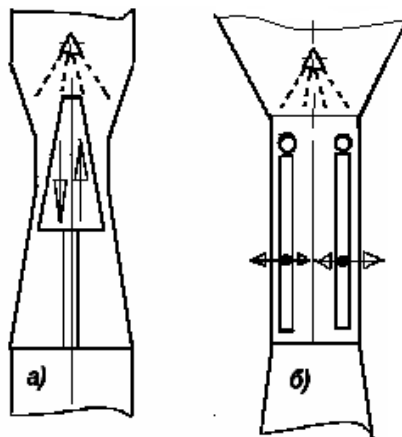


Рисунок 4.10 – Варіанти регулювання площі перетину:

- а – регулювання кільцевого перетину переміщенням обтікателю за віссю;
- б – регулювання цільового перетину поворотами заслінок

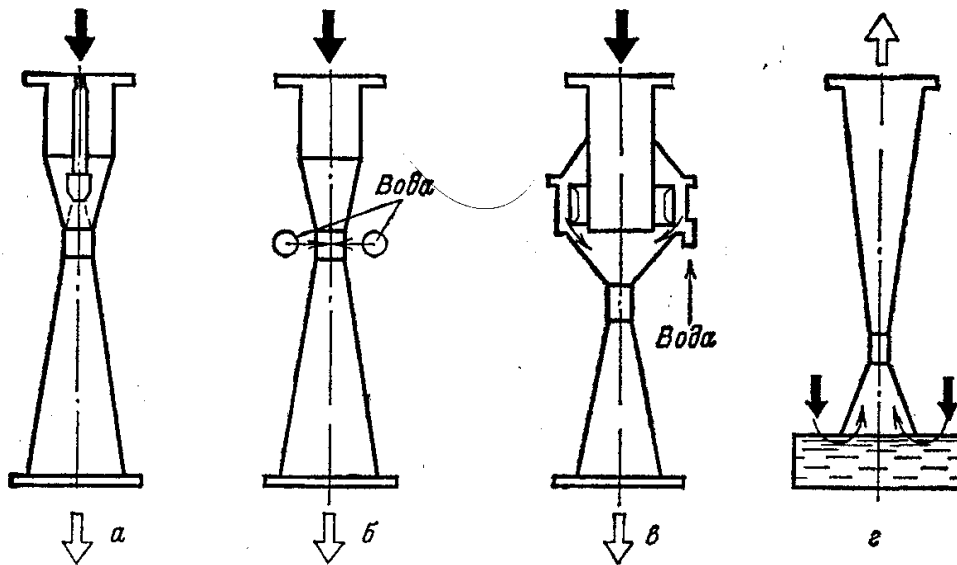


Рисунок 4.11 – Способи підведення рідини:

- а – центральне форсункове підведення; б – периферійне зрошення;
 в – плівкове зрошення; г – безфорсункове зрошення

4.2.4 Апарати відцентрової дії

Призначені для очищення газів від пилу с розміром часток менше 5–10 мкм і концентрацією на вході не більше 2–5 г/м³.

Принцип дії АДВ заснований на відкиданні на стінку часток пилу відцентровими силами, що виникають під час закручування газового потоку в апараті і змиванні їх плівкою рідини, що стікає по стінкам.

Плівка рідини на стінці апарату безперервно зміщується донизу і утворюється за рахунок подавання води спеціальними соплами, що розташовують по колу у верхній частині апарату.

Параметри, що досягаються в апараті:

- швидкість газу у поперековому перетині корпусу – 4–5 м/с;
- швидкість газу у вхідному патрубку – 15–25 м/с;
- витрата газу – до 50 000 м³/ч.

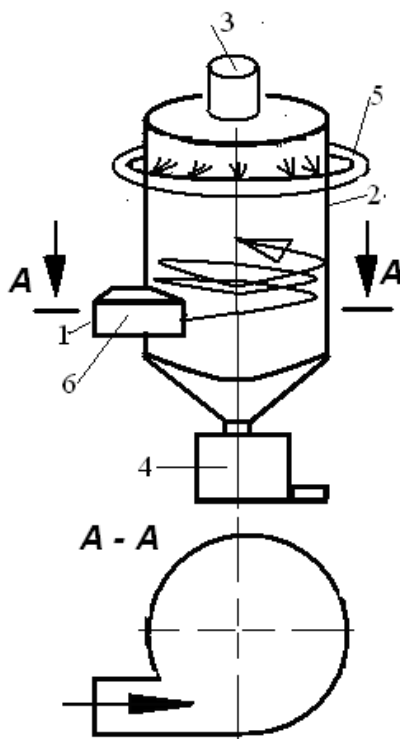


Рисунок 4.12 – Схема мокрого апарату відцентрового типу:
 1- тангенційний вхідний патрубок; 2 – циліндричний корпус; 3 – вихідний патрубок; 4 – гідрозатвор; 5 – колектор зрошуючих форсунок; 6 – зрошуюча форсунка

Ступінь очистки залежить від d_u і $d_{скр}$. Витрата води задається виходячи з можливості створення безперервної рідкої плівки на внутрішній поверхні апарату.

Витрата води визначається за емпіричною формулою:

$$M_v = 0,14 \pi d_{скр}, \text{ кг/с.}$$

Розрахунок ступеня очистки виконують для скрубера діаметром 1 м, а потім перераховують на апарат довільного діаметру за формулою:

$$\eta = 100 - (100 - \eta_1) \cdot \sqrt{d_{скр}},$$

де η – ступінь очистки для скрубера, %;

η_1 – ступінь очистки для скрубера діаметром 1 м, %.

Значення η_1 вираховують за формулою виходячи з фракційного ступеню очистки і фракційного складу пилу

$$\eta_1 = \sum \eta_{\phi} \frac{\Phi_{\text{ex}}}{100},$$

де η_{ϕ} – фракційний ступінь очистки, %;

Φ_{ex} – фракційний склад пилу, %.

Зі збільшенням висоти скрубера H ступінь очистки зростає, але після $H = (3-4)d_{\text{скр}}$ зростання припиняється, тому приймають $H = 4d_{\text{скр}}$.

Гідрравлічний опір скрубера знаходять за формулою:

$$\Delta P = \xi_{\text{скр}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot \omega_{\text{г}}^2 / 2,$$

де $\xi_{\text{скр}}$ – коефіцієнт гідрравлічного опору скрубера, знаходиться у межах 30–45, причому більш високі значення відповідають меншим діаметрам апарату;

$\omega_{\text{г}}$ – швидкість газу у поперековому перетині корпусу.

4.2.5 Апарати ударно-інерційної дії

До апаратів УІД відноситься велика група пиловловлювачів, у яких контакт газу з рідиною відбувається за рахунок ударяння газового потоку о поверхню рідини. Апарати мають один або декілька щільових каналів або перетинок, нижня частина яких затоплена рідиною.

При проходженні каналів очищуємі газу ударяються об поверхню рідини і частково захоплюють її. В результаті утворюється водяна завіса з бризок та крапель, на якій під дією сил інерції осаджуються частки пилу, що містяться у газі. Краплі рідини, що видаляються з каналів, відділяються від газів у послідовно встановлених краплєвловлювачах. Основна частина рідини, що захоплюється газами, після виходу з каналів падає у нижню частину апарату у вигляді завіси, змішується з іншою рідиною і знов бере участь у процесі очистки. В результаті багаторазового використання рідини у ній значно зростає концентрація завислих часток, а у нижній частині апарату у зливному патрубці

накопичується шлам. Через визначений час, що залежить від вхідної запиленості газів, шлам періодично видаляється з апарату. Вентилятор, що забезпечує транспортування газів через апарат, монтується безпосередньо в апараті, що забезпечує компактність установки.

Апарати УІД призначені для очистки газів від часток пилу діаметром не менш ніж 5–10 мкм в умовах відсутності достатньої кількості чистої води і невисоких температурах очищуємого газу.

Принципова схема апарату ударно-інерційної дії типу ПВМ (пиловловлювач вентиляційний мокрий) наведена на рис.4.13.

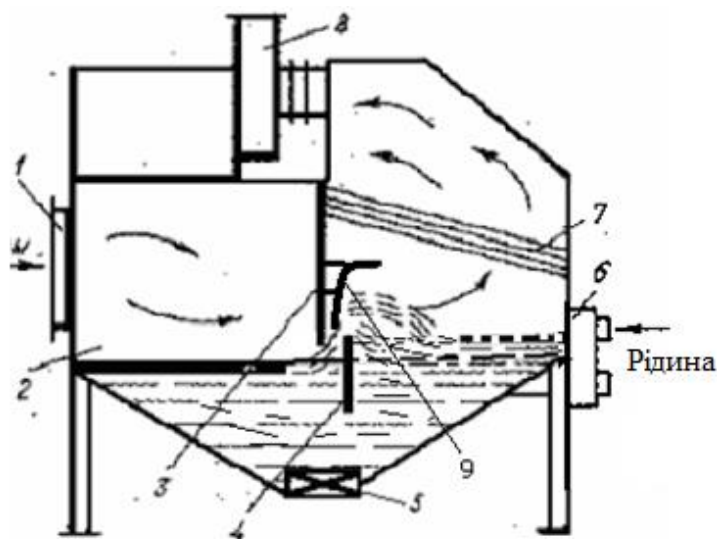


Рисунок 4.13 – Апарат ПВМ:

- 1 – вхідний патрубок; 2 – камера заплених газів; 3 – верхня перетинка;
- 4 – нижня перетинка; 5 – скребковий конвеєр; 6 – регулятор рівня;
- 7 – жалюзійний краплевловлювач; 8 – вентилятор; 9 – водовідбійник

Апарат може бути обладнаний пристроєм для автоматичної підпитки водою. Вловлений пил осаджується на дні корпуса і видаляється скребковим конвеєром. Витрата води на зрошення газу не перевищує $0,03 \text{ кг/м}^3$ газу, визначається тільки витратами на випаровування і утворення шламу.

Параметри, що досягаються в апараті:

- витрата газу – 3 000–40 000 м³/год;
- витрата газу на 1 м довжини перетинки 2 000–7 500 м³/год;
- ступінь очистки при $d_u = 10$ мкм може досягати 98–99 %;
- гідравлічний опір не перевищує 1,5–3,0 кПа;
- швидкість газу в щілині між перетинками досягає 15 м/с.

Гідравлічний опір визначається за однією з формул:

$$\Delta P = 10 \cdot \delta + 15 \sqrt{Q_z}, \quad \Delta P = 10^4 \cdot \delta + 880 \sqrt{Q_z},$$

де δ – висота верхнього рівня води від нижньої кромки верхньої перетинки, м;

Q_z – витрата газу на 1 м довжини перетинки, м³/с.

При логарифмічно нормальному розподілі ступінь очистки визначається з використанням робочих параметрів пиловловлювачів (табл.4.2) за формулою

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

$$x = \frac{\lg d_m / d_{50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_u}},$$

де d_{50} – діаметр часток, що осаджуються з ефективністю 50 %;

$\lg \sigma_\eta$ – стандартне відхилення функції розподілу парціальних коефіцієнтів очистки;

$\lg \sigma_u$ – середньоквадратичне відхилення в функції розподілу часток.

Таблиця 4.2 – Параметри апарату ударно-інерційної дії

$\sigma, \text{м}$	$d_{50}, \text{мкм}$	$\lg \sigma_\eta$
0,04	1,5	0,3
0,08	1,5	0,24
0,20	1,5	0,17

Замість розрахунків за формулою η можна використати таблицю функції $\Phi(x)$ (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Значення нормальної функції розподілу $\Phi(x)$

x	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$\Phi(x)$	0,692	0,726	0,758	0,788	0,816	0,841	0,864	0,885	0,903

Апарат ударно-інерційної дії з щільовим каналом суцільної форми (імпелером), що утворений спеціально спрофільованими перетинками, має назву ротоклон (рис. 4.14).

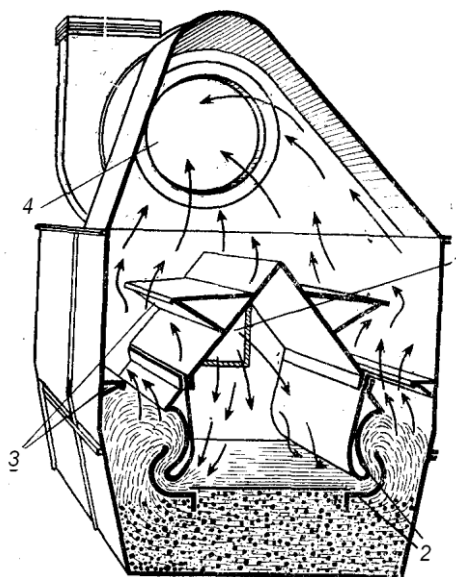


Рисунок 4.14 – Ротоклон (типу N):

- 1 – вхід газу на очистку; 2 – направляючі лопатки (перетинки);
3 – краплевідбійники; 4 – вихід очищеного газу

4.2.6 Барботажні пінні апарати

Барботажні пінні апарати призначені для очистки невеликих обсягів газу від часток пилу розміром не менш 5 мкм.

Барботажний пінний апарат являє собою корпус з круглим перетином, який перегороджений горизонтальною решіткою з рівномірно розподіленими дрібними отворами. Запилений газ подається під решітку і відводиться з верхньої частини апарату.

Зрошуюча рідина подається на решітку зверху або збоку. Відпрацьовану рідину можна відводити повним провалом через решітку (а) або частковим провалом через решітку і частково через переливний відсік (б).

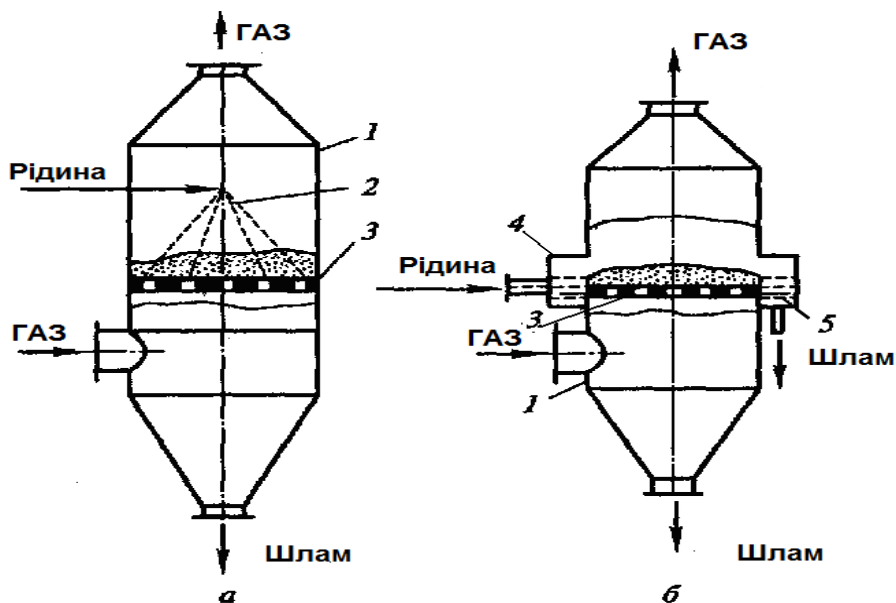


Рисунок 4.15 – Схема барботажного пінного апарату:

а – з провальною тарілкою (решіткою); б – з переливною тарілкою:

- 1 – корпус; 2 – зрошуючий пристрій; 3 – решітка; 4 – приймальна коробка;
5 – зливна коробка.

При швидкості газу в апараті до 1 м/с спостерігається барботажний режим, при підвищенні швидкості режим переходить у пінний, при якому рідина, що знаходиться на решітці, переходить у стан турбулізованої піни.

Подальше збільшення швидкості призводить до виникнення хвильового режиму, що характеризується коливаннями шару рідини внаслідок прориву газових струменів на різних ділянках решітки. При цьому спостерігається зростання гідравлічного опору і винесення крапель рідини, що призводить до порушення нормальної роботи апарату. При подальшому збільшенні швидкості спостерігається захлинання пиловловлювача, при якому припиняється провалювання рідини через решітки.

Основні параметри пінного барботажного апарату:

- діаметр корпусу - до 2–2,5 м;
- живий переріз решітки – 0,2–0,25 м²/м²;
- діаметр отворів – 4–8 мм;
- швидкість газів у отворах решітки – 6–10 м/с;
- швидкість газів у отворах при захлинанні – 10–17 м/с;
- питоме зрошення– 0,4–0,6 л/м³.

При очистці газів з запиленістю більш ніж 15–20 г/м³, в апараті встановлюють дві решітки.

Гідравлічний опір решітки з шаром піни визначається за формулою:

$$\Delta P = A^2 \cdot \rho_z \frac{\omega_z^2}{2 \cdot f_0^2} + \Delta P_\delta,$$

де A – допоміжний коефіцієнт;

ρ_z – густина газу, кг/м³;

ω_z – швидкість газу, м/с;

f_0 – площа живого перерізу решітки;

ΔP_δ – частка гідравлічного опору, обумовлена поверхневим натягінням рідини, Па.

Ефективність пиловловлювання визначають наступним чином: за допомогою кривих (рис. 4.16) визначають еталонні парціальні коефіцієнти очистки. Криві, наведені на графіку, отримані при швидкості газу в апараті під решіткою $\omega = 2$ м/с і висоті шару піни на решітці $H = 0,09$ м.

Парціальні коефіцієнти очистки для апаратів з іншими параметрами ω_z і H_n визначають за формулою

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{\omega_z}{2}\right)^{0,036} \left(\frac{H}{0,09}\right)^{0,032},$$

де η_0 – еталонний парціальний коефіцієнт очистки при $\omega_r = 2$ м/с та $H = 0,09$ м;

H – висота шару піни на решітці, м.

Загальна ефективність пиловловлювання η_o розраховується за формулою

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

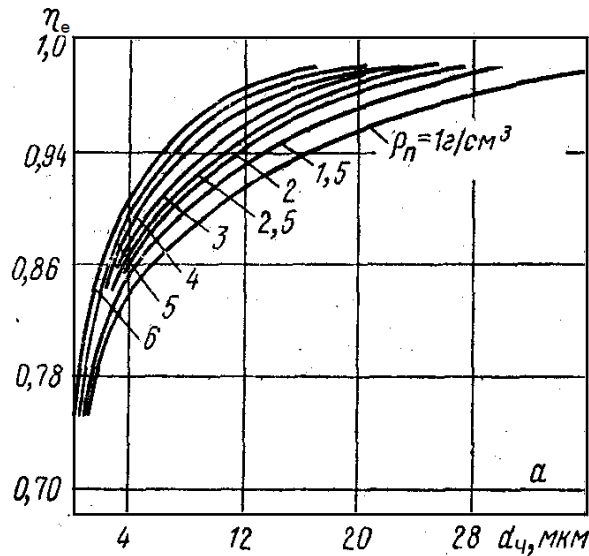


Рисунок 4.16 – Криві парціальної ефективності пінного апарату

4.3 Допоміжне обладнання мокрої очистки газів

Внаслідок заборони скиду забрудненої води до водойм, в мокрих газоочистках використовують зворотне водопостачання, при якому в системах використовується одна й та ж сама вода, що безперервно очищується та охолоджується.

Система зворотного водопостачання зазвичай містить у собі відстійник для осадження завислих домішок, пристрою для охолодження зворотної води, фільтри для очищення води, насоси для подавання охолодженої води до системи газоочистки (рис. 4.17).

Хімічна обробка води, якщо вона є необхідною, здійснюється зазвичай у відстійниках.

Гази, що виходять після очистки з мокрих пиловловлювачів, завжди містять деяку кількість вологи у вигляді крапель, завислих у газі.

Крапельний винос у газах є шкідливим, він викликає корозію обладнання

і сприяє утворенню на різних ділянках газоходу відкладень, що порушують нормальну роботу установки. Тому майже кожний пиловловлюючий апарат мокрого типу обладнаний сепаратором вологи, тобто крапельловлювачем.

У крапельловлювачах при осадженні краплі агломеруються і відводяться з крапельловлювача у вигляді потоку рідини.

Для сепарації крапель із газів використовують наступні механізми осадження: гравітаційний, інерційний, відцентровий.

Бризковловлюючі апарати можуть монтуватися в одному корпусі з пиловловлювачем (вбудовані) або у вигляді окремого апарату встановлюються за ним.

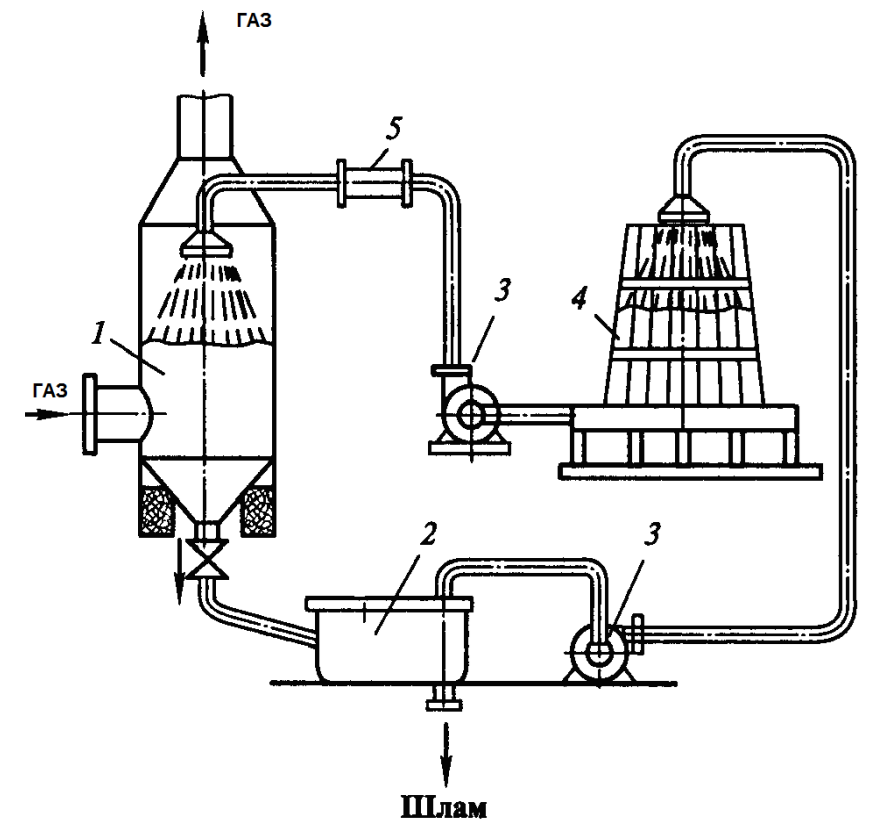


Рисунок 4.17 – Схема оборотного водопостачання:

- 1 – пиловловлювач; 2 – відстійник; 3 – насос; 4 – охолоджувач (градирня);
- 5 – фільтр для очистки води

4.3.1 Краплевловлювачі

Гравітаційні краплевловлювачі являють собою осаджувальну камеру, в якій штучно зменшується швидкість газів. Усі краплі, час осадження яких менший або дорівнює часу їх перебування у осаджувальній камері, будуть видалені з газового потоку. Гравітаційні краплевловлювачі використовуються для вловлювання великих крапель при великих навантаженнях по рідині. Головний їх недолік – великі розміри.

Інерційні краплевловлювачі (ІК) являють собою ділянку газоходу, який заповнений спеціальною насадкою, в якості якої можуть бути використані:

- подрібнена порода, стружка, галька;
- пластини зигзагоподібного та хвилеподібного профілю;
- жалюзі, прутки, кутки.

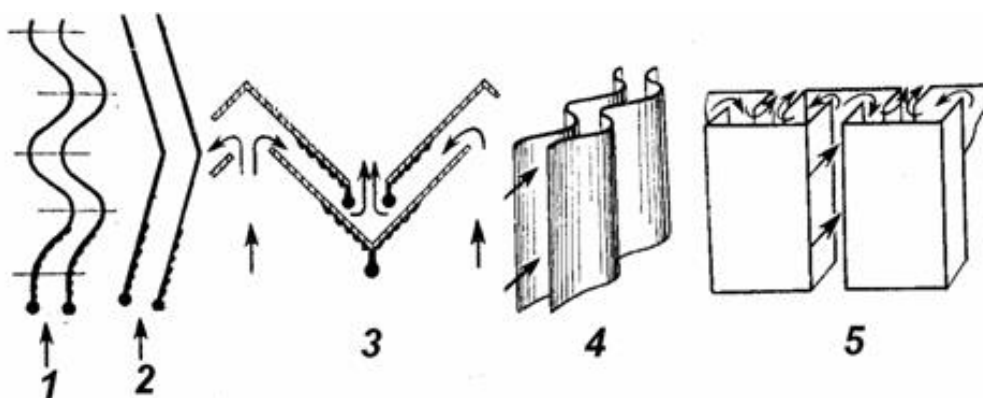


Рисунок 4.18 – Елементи сепараційних пристроїв інерційних краплевловлювачів:
1,2 – горизонтальні жалюзійні; 3 – куткові; 4 – вертикальні жалюзійні;
5 – швеллеркові

Головний недолік ІК – можливість утворення відкладень пилу.

Ефективність ІК зростає зі зростанням швидкості газів до критичного значення швидкості $\omega_{кр}$. При швидкості газу більшу за критичну $\omega_2 > \omega_{кр}$ відбувається різке зменшення ефективності сепарації із-за виникнення вторинного унесення, тобто настає «захливання» апарату.

Критичну швидкість визначають за формулою:

$$\omega_{кр} = K_c \sqrt{\frac{\rho_{ж} - \rho_2}{\rho_2}}, \text{ м/с,}$$

де K_c – коефіцієнт, який залежить від конструкції апарату; $K_c = 0,1-0,3$.

Відцентрові краплевліювачі (ВК) – отримали найбільше поширення серед краплевліювачів. Головна перевага ВК – висока ефективність і менша здатність до утворення відкладень пилу.

Відцентрові краплевліювачі можуть бути таких типів:

а) колінний сепаратор – це «коліно» прямокутного перерізу з співвідношенням $R/r=2$. Спеціальний штуцер слугує для відведення вловленої рідини з внутрішніх стінок підводящого газоходу. Вузол відводу відсепарованої в краплевліювачі рідини виконаний у вигляді розриву каналу «коліна» і являє собою два послідовно встановлених дифузори з кутом розкриття 60° ;

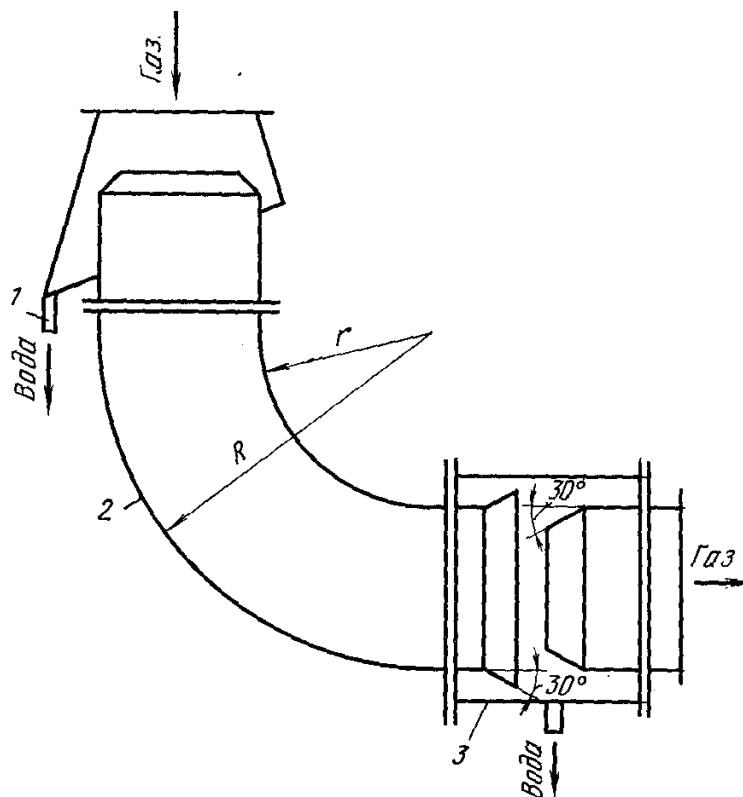


Рисунок 4.19 – Колінний сепаратор:

1 – спеціальний штуцер для відведення рідини; 2 – коліно; 3 – вузол відводу відсепарованої рідини (розрив каналу «коліна»)

б) циклон-краплевловлювач (ЦК) – принцип дії ЦК заснований на використанні відцентрової сили для осадження крапель на стінку і відведення їх у вигляді потоку рідини через патрубок у конічному днищі. Відцентрова сила виникає у результаті тангенційного введення потоку газу до циліндричного корпусу апарату. замість тангенційного вводу може бути використаний лопатковий завихрювач.

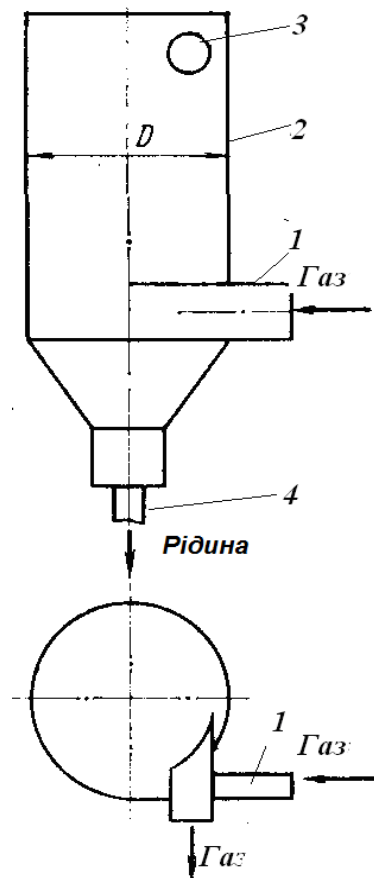


Рисунок 4.20 – Циклон-краплевловлювач:

1 – вхідний патрубок; 2 – корпус; 3 – вихідний патрубок; 4 – відвод рідини

4.3.2 Обладнання для підведення та диспергування рідини

Використовують два види розпилюючих пристроїв:

- форсунки (для розпилення рідини);
- зрошувачі (для рівномірного розподілу зрошуючої рідини по перерізу).

У техніці газоочистки частіш за все використовують форсунки механічної і пневматичної дії. Форсунки механічної дії бувають відцентрового і струйного типу.

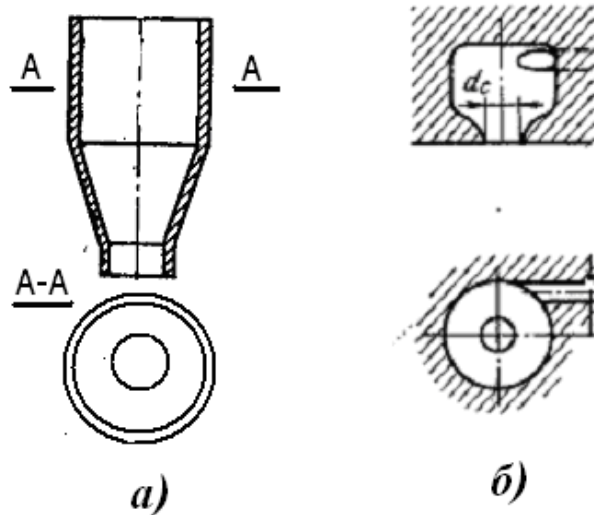


Рисунок 4.21 – Струйна (а) і відцентрова (б) форсунки

Факел розпилюємої рідини може бути (рис. 4.22):

- циліндричний;
- конічний (переріз – кільце): полий (а) і заповнений (б)
- віялоподібний (плаский) – в).

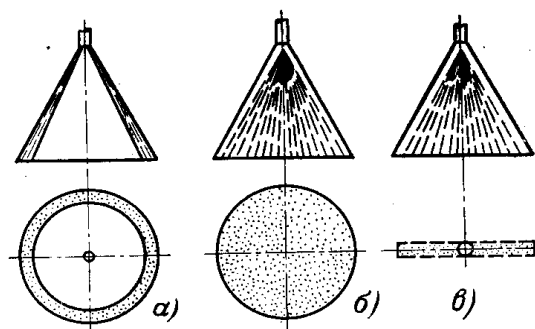


Рисунок 4.22 – Форми факела форсунок:

а – полий факел; б – заповнений факел; в – плаский факел

Об'ємна витрата рідини, що розпилюється форсункою, визначається за формулою:

$$Q_v = \frac{\pi d_c^2}{4} \xi \sqrt{\frac{P_v}{\rho_v}},$$

де d_c – діаметр сопла форсунки, м;

P_v – тиск води перед форсункою, Па;

ρ_v – густина води, кг/м³;

ξ – коефіцієнт витрати (для струйних форсунок $\xi = 0,75-0,98$; для відцентрових форсунок $\xi = 0,2-0,3$).

Швидкість витоку рідини з сопла визначається за формулою:

$$\omega = \frac{4Q_v}{\pi d_c^2 \varphi},$$

де φ – коефіцієнт заповнення сопла (залежить від конструкції форсунки);

Q_v – витрата рідини, м³/с.

Для більшості форсунок $\varphi < 1,0$. Це пояснюється стисканням струменю при витоку рідини для струйних форсунок і утворенням повітряного вихру для відцентрових.

Розрахунок конструктивних параметрів форсунок є індивідуальним для кожної конструкції і побудований на емпіричних формулах.

У форсунках з пневматичним розпиленням потік рідини подрібнюється за рахунок змішування з високошвидкісним потоком газу або пари. Рідина подається під невеликим тиском (P_v до 0,4 Па) або засмоктується за рахунок інжектуючої дії газового потоку. Пневматичне розпилення забезпечує більш дрібні розміри крапель, але при цьому збільшуються енергозатрати і ускладнюється система підводу рідини.

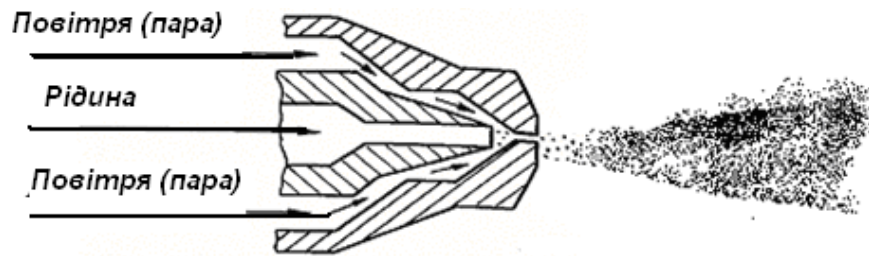


Рисунок 4.23– Схема пневматичної форсунки

4.4 Очистка промислових викидів від газових домішок

Складність процесів очистки технологічних і вентиляційних викидів від газо- і пароподібних домішок викликана наступним:

- висока запиленість викидів;
- висока температура;
- низька і змінна протягом часу концентрація шкідливих домішок;
- складний хімічний склад.

Методи очищення промислових викидів за характером протікання фізико-хімічних процесів поділяють на групи:

- абсорбція (фізична)– промивка викидів інертними розчинниками, що поглинають домішки. При фізичній абсорбції енергія взаємодії молекул газу і абсорбенту у розчині не перевищує 20 кДж/моль;

- хемосорбція – промивка викидів розчинниками-реагентами, що хімічно зв'язують домішки. Енергія взаємодії молекул розчиненого газу з активним компонентом абсорбенту – хемосорбентом – складає більш за 25 кДж/моль;

- адсорбція – поглинання газоподібних домішок твердими активними речовинами;

- термічна нейтралізація домішок шляхом спалювання;
- каталітична очистка газів;
- біохімічна очистка газів.

4.4.1 Абсорбція

Спосіб абсорбції (фізична і хемосорбція) відноситься до «мокрих» методів очистки промислових викидів.

Головні переваги абсорбційних методів:

- економічність при очищенні великих обсягів газу;
- можливість реалізації безперервного процесу.

Головні недоліки:

- значне зниження температури газу, що погіршує умови розсіювання в атмосфері;
- складність обладнання – громіздка система рідинного зрошення.

Очистка газових викидів методом абсорбції полягає у поглинанні одного або декількох газових компонентів (абсорбтива) цієї суміші рідким поглиначем (абсорбентом) з утворенням розчину. Рушійною силою є градієнт концентрацій на межі фаз «газ-рідина». Розчинений у рідині компонент газоповітряної суміші (абсорбат) завдяки дифузії проникає у внутрішній шар абсорбенту.

Фактори, що визначають процес абсорбції:

- площа поверхні контакту фаз;
- турбулентність потоків;
- коефіцієнт дифузії;
- розчинність в абсорбенті компоненту, що видаляється.

Розчинність залежить від температури. Газ вважається добре розчинним, якщо за нормальних умов ($t = 273^{\circ}\text{K}$, $P = 101,3 \text{ кПа}$) розчинність досягає декількох сотень грамів на 1 кг абсорбенту.

Абсорбція супроводжується утворенням великої кількості рідких відходів (шламів), що можуть у подальшому перероблюватися (регенеруються) і пов'язані з десорбцією.

При здійсненні процесу абсорбційної очистки газу може виникнути необхідність у додатковому підведенні або відведенні тепла, підвищенні тиску газу, попередній очистці його від пилу.

Абсорбент повинний задовольняти наступним вимогам:

– висока здатність до поглинання по відношенню до компоненту, що вловлюється;

– легка регенерація при десорбції;

– висока селективність до компоненту, що вловлюється;

– невисока летючість;

– термохімічна стійкість;

– корозійна інертність до матеріалу апарату;

– низька вартість і доступність.

У якості абсорбентів використовують воду, різноманітні водні розчини і суспензії. Абсорбенти, що найбільш часто використовуються для очистки газів, наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Абсорбенти для очистки газів

Компоненти, що поглинаються	Абсорбенти
N_2O_3 , NO_2 , N_2O_5	Водні розчини і суспензії: NOH , Na_2CO_3 , KOH , K_2CO_3 , $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$
NO	Розчини $FeCl_2$, $FeSO_4$
SO_2	Вода, водні розчини і суспензії: Na_2SO_3 , NH_4OH , $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$
CO	Рідкий азот, мідноаміачні розчини $[Cu(NH_3)]_nCOCH$

Для організації контакту газу, що очищується, з абсорбентом можуть використовуватися апарати наступних типів:

– насадковий скруббер (колона);

– зрошувальний скруббер;

– барботажний пінний апарат.

Насадкові скруббери – це колона, що заповнена тілами різної форми. Насадку засипають у колону на опорну решітку у безладі або укладають правильними рядами (регуляторна насадка).

Забруднений газ входить у нижню частину колони, проходить скрізь шар

насадки, де відбувається його очищення і видаляється із колони через патрубок у верхній частині колони. У верхню частину колони через зрошувач вводять абсорбент, а з нижньої частини колони відводять відпрацьований розчин. Рідину, що покидає абсорбер, регенерують шляхом десорбування забруднюючої речовини, і повертають у процес або виводять у якості відходу. Насадка, що укладена на газорозподільчу решітку, заповнює внутрішню порожнину апарату і призначена для збільшення поверхні рідини, що розтікається по ній у вигляді плівки.

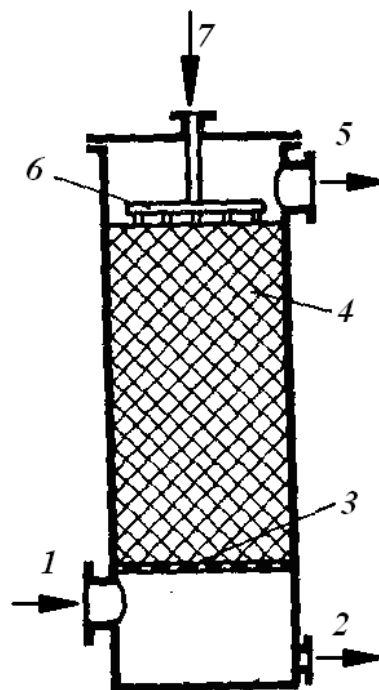


Рисунок 4.24 – Протитокковий насадковий скрубер:

1 – вхід газу на очистку; 2 – відведення шламу; 3 – опорна решітка; 4 – насадка;
5 – вихід очищеного газу; 6 – зрошувач; 7 – підведення абсорбенту

Насадкові колони варто використовувати при суміщенні процесів уловлювання добре змочуваного пилу, охолодження газів і абсорбції. Однак часте забивання насадки (особливо завантаженої накидом) при обробці запиленних газів обмежує їх використання.

У якості насадки використовують тіла (елементи) різної геометричної форми, які виготовляють з хімічно інертних матеріалів.

Розрахунок скрубера полягає у визначенні об'єму поглинаючої рідини Q_a , поверхні контакту газу з рідиною F і параметрів допоміжної апаратури (ємності, насоси).

Об'ємна витрата поглинаючої рідини Q_a визначається з рівняння матеріального балансу абсорбера: вага компоненту, що поглинається (m), видалена з очищуємого газу, дорівнює вазі цього компоненту, що перейшла у рідину:

$$m = Q_2 (y_1 - y_2) = Q_a (x_2 - x_1),$$

де Q_2 – об'ємна витрата димового газу, м³/с;

x_2, x_1 – початкова і кінцева концентрації компонента, що поглинається, у поглинаючій рідині, г/м³;

y_1, y_2 – початкова і кінцева концентрації компонента, що поглинається, у газі, що очищується, г/м³.

Необхідна поверхня контакту фаз F визначається за формулою:

$$F = (10^{-3} m) / (K_a \Delta P_{cp}),$$

де K_a – коефіцієнт абсорбції (масопередачі), кг/(м² с Па);

ΔP_{cp} – середня рушійна сила абсорбції, Па.

K_a характеризує швидкість розчинення газового компонента в рідині і визначається загальним опором дифузії цього компонента через газову і рідинну плівки.

Рушійна сила абсорбції дорівнює різниці парціальних тисків поглинаємого компонента і рівновісного парціального тиску цього компонента над поглинаючою рідиною і визначається за формулою:

$$\Delta P_{cp} = \frac{(P_2^I - P_{жс}^I) - (P_2^{II} - P_{жс}^{II})}{\ln \left[\frac{(P_2^I - P_{жс}^I)}{(P_2^{II} - P_{жс}^{II})} \right]},$$

де P_2^I, P_2^{II} – парціальний тиск поглинаємого компонента в газовій фазі відповідно на вході та виході з апарату, Па;

$P_{жс}^I, P_{жс}^{II}$ – парціальний рівновісний тиск компонента, що поглинається, відповідно над рідиною на вході та виході з апарату, Па.

4.4.2 Хемосорбція

Хемосорбція заснована на поглинанні газів та парів твердими або рідкими поглиначами з утворенням малолетких і малорозчинних хімічних сполук. При хемосорбції молекули розчиненого газу реагують з активним компонентом абсорбента – хемосорбентом. Здатність до поглинання хемосорбента майже не залежить від тиску, тому хемосорбція є більш вигідною за умови невеликих концентрацій домішок у відходящому газі.

Більшість реакцій, що протікають при хемосорбції, є екзотермічними і оборотними. Тому при підвищенні температури речовина, що утворилася у розчині, розкладається з виділенням вихідних компонентів. На цьому заснований механізм десорбції (регенерації хемосорбента).

Хемосорбція використовується при очистці від CO_2 – розчинами карбонатів (Na_2CO_3 , K_2CO_3):



Процес хемосорбції реалізується у насадкових колонах, пінних і барботажних скруберах, розпилюючих апаратах типу скрубєрів Вентурі і в апаратах з механічними розпилювачами.

Широке розповсюдження отримали апарати з рухливою насадкою, що характеризуються великою пропускною здатністю, низьким гідравлічним опором і високою ефективністю.

В цих апаратах уловлювання пилу відбувається у шарі рухливої насадки. Елементи насадки рухаються у всіх напрямках з високою швидкістю, розбивають вихори газової фази на багато невеликих вихрів та струмків. В результаті зростає міжфазна поверхня, час контакту фаз, з'являється можливість роботи апарату при більш високих швидкостях.

Головним чином використовують насадкові тіла у вигляді порожнистих і суцільних шарів. Матеріалом насадки є гума, пластмаса і інші матеріали, щільність яких є меншою за щільність води.

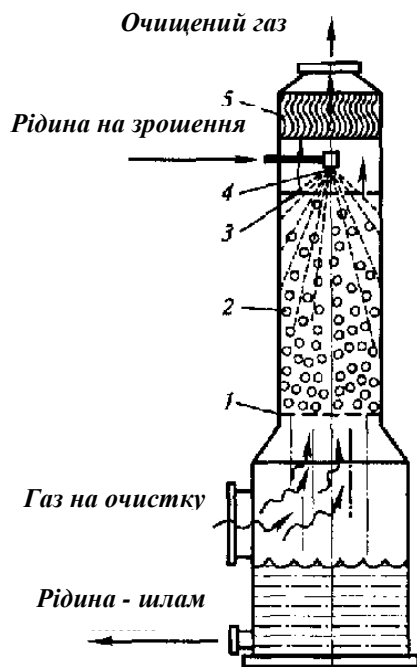


Рисунок 4.25 – Апарат з рухливою насадкою:

- 1 – опорна тарілка; 2 – шарова насадка; 3 – відзеркалююча тарілка;
4 – зрошувач; 5 – бризковловлювач

4.4.3 Адсорбція

Метод адсорбції заснований на фізичних властивостях деяких твердих тіл з ультрамікроскопічною структурою селективно витягати і концентрувати на своїй поверхні окремі компоненти з газової суміші.

Адсорбцію поділяють на:

- фізичну адсорбцію;
- хемосорбцію.

При фізичній адсорбції молекули газу прилипають до поверхні твердого тіла під дією міжмолекулярних сил притяжіння.

Перевага фізичної адсорбції – зворотність процесу. При збільшенні температури або зменшенні тиску адсорбата поглинутий газ легко десорбується без зміни хімічного складу.

В основі процесу хемосорбції покладена хімічна взаємодія між адсорбентом і адсорбуємою речовиною. Процес хемосорбції, як правило, є

незворотнім, тому що при десорбції змінюється хімічний склад адсорбата.

В якості адсорбента використовують речовини, що мають велику питому площу поверхні (наприклад – питома поверхня активованого вугілля складає 10^5 – 10^6 м²/кг).

Метод адсорбції використовують у разі:

- видалення парів розчинників і органічних смол, ефіру, ацетону в процесі фарбування, виробництва склотканин і скловолокна, нітроцелюлози;
- очистка вихлопних газів автомобілів;
- видалення ядовитих компонентів, що викидаються в атмосферу через лабораторні витяжні шафи;
- видалення радіоактивних газів при експлуатації ядерних реакторів.

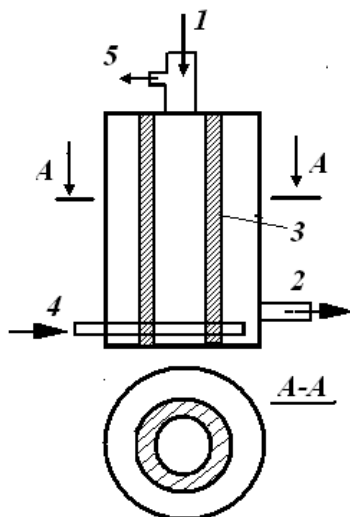


Рисунок 4.26 – Схема адсорбера:

1 – вхід газу на очистку; 2 – вихід очищеного газу; 3 – шар адсорбуючої речовини; 4 – підвод водяної пари при десорбції; 5 – вихід відпрацьованої пари десорбції

Адсорбери виконують у вигляді вертикальних, горизонтальних або кільцеподібних ємностей, що заповнюють поруватим адсорбентом, через який фільтрується потік очищеного газу. Шар адсорбенту може бути нерухомим або рухаючимся.

Найбільш поширеними є адсорбери з нерухомим адсорбентом періодичної дії, у яких період контактування очищуваного газу з твердим

адсорбентом чередуються з періодом його регенерації. Вони вирізняються простотою конструкції. Їх недоліками є:

- велика металоємність і габарити внаслідок малих швидкостей газу ($\omega = 0,15\text{--}0,5$ м/с);

- великі енергетичні витрати, пов'язані з подоланням гідравлічного опору шару адсорбенту.

Основний параметр адсорбенту – адсорбційна здатність за вилученим компонентом – вага речовини, поглинена одиницею ваги адсорбенту.

Адсорбційна здатність залежить від:

- концентрації адсорбуємої речовини (парціального тиску газу);
- площі поверхні контакту;
- температури;
- наявності інших домішок.

Адсорбційну здатність визначають за ізотермами адсорбції.

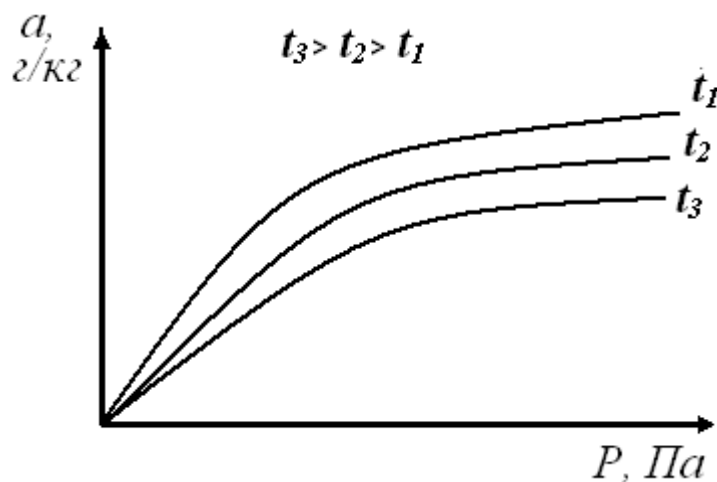


Рисунок 4.27 – Ізотерми сорбції адсорбенту

Із збільшенням температури відбувається зниження адсорбційної здатності активованого вугілля. На цій властивості адсорбентів заснований процес їх регенерації. Регенерацію здійснюють шляхом нагрівання насиченого адсорбенту гарячою парою або газом.

При розрахуванні і проектуванні адсорбера використовують наступні вихідні данні:

- об'ємна витрата очищуємого газу Q , м³/с;
- концентрація видаляємої домішки C_o , мг/м³;
- тиск очищуємого газу, P , Па.

Мінімально необхідну масу адсорбенту (m , кг) визначають з рівняння матеріального балансу з вловлюємого компоненту:

$$m a_{\infty} = K_3 C_o Q \tau ,$$

де Q – витрата газу;

C_o – концентрація вловлюємого компоненту , мг/м³;

τ – час процесу адсорбції;

K_3 – коефіцієнт запасу, $K_3 = 1,1 - 1,2$;

a_{∞} – статична поглинальна здатність, мг/кг.

Різновидом адсорбційної очистки є іонообмінна очистка газів. На відміну від традиційних сорбентів, іоніти мають комплексні властивості адсорбентів, абсорбентів і хемосорбентів.

4.4.4 Термічне очищення газів

В основі термоокислювальної очистки або вогняного знешкодження газоподібних відходів знаходиться реакція окислення токсичних речовин, що містяться у них, головним чином органічного походження.

Головні переваги цього методу:

- універсальність у відношенні домішок різного виду;
- можливість використання у тому разі, коли очистка іншими методами є складною;
- можливість повної автоматизації процесу;
- компактність обладнання;
- можливість рекуперації тепла.

Недоліки методу:

- необхідність підтримувати високу температуру (більш за 700–800 °С);
- економічна доцільність тільки при легкій окислюваності вловлюємих компонентів;
- обмеження галузі використання характером утворюваних продуктів згоряння (при згорянні сірко- і фосформістких домішок токсичність продуктів згоряння вища, ніж у вихідних речовин).

Спалювання є економічно доцільним у тих випадках, коли гази, що відходять, забезпечують підведення значної частки енергії (не менш 50 %), необхідної для здійснення процесу.

Одна з проблем, пов'язаних з спалюванням, виникає при досягненні температури полум'я 1300 °С і більше. При цьому починається процес інтенсивного утворення NO_x і процес спалювання, що знезаражує забруднюючі речовини одного типу, стає джерелом викидів забруднюючих речовин іншого типу.

Процес спалювання домішок здійснюється на факелі або в камері.

Факел – це відкритий пальник, спрямований вертикально вгору. Факел використовують для спалювання горючих токсичних відходів, що погано піддаються іншим видам обробки.

Головні вимоги, що пред'являються до камери спалювання домішок – високий ступінь турбулентності газового потоку, забезпечення часу перебування більш за 0,2–0,7 с. Типовий приклад використання – додаткове допалювання пари розчинників – відходів лакофарбувальних цехів.

Камера спалювання – це циліндрична топка, скомпонована з газовим пальником. Забруднені органічними домішками гази поступають через тангенційні канали та у пальник і в топку. Природний газ подається в пальник по трубі. Атмосферне повітря подається у пальник по центральній трубі тільки у тому разі, якщо вміст кисню у знезаражуємому газі менш за 15 %.

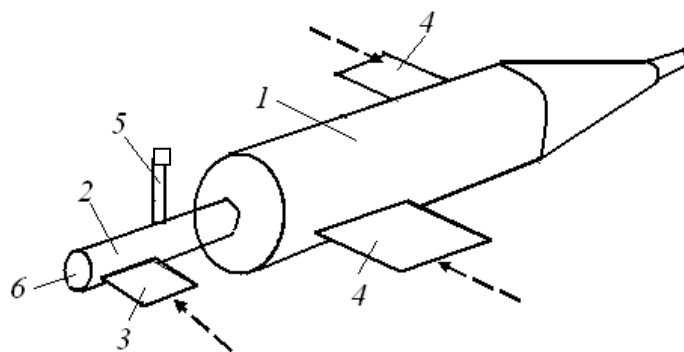


Рисунок 4.28 – Камера спалювання:

1 – циліндрична топка; 2 – газовий пальник; 3 – тангенційна подача газу в пальник; 4 – тангенційна подача газу в топку; 5 – подача газу в пальник; 6 – подача атмосферного повітря в горілку.

Подібна камера спалювання забезпечує:

- ступінь очистки – 90–99 %;
 - час перебування викидів у високотемпературній зоні $\geq 0,5$ с;
 - температура в камері: а) при спалюванні вуглеводнів 500–650 °С;
- б) при спалюванні окису вуглецю 660–750 °С.

4.4.5 Каталітична очистка газів

Каталітична очистка газів полягає у перетворенні токсичних компонентів промислових викидів у речовини нешкідливі або менш шкідливі шляхом введення в систему додаткових речовин – каталізаторів. Каталізатор, реагуючи з однією з реагуючих сполук, утворює проміжну речовину, яка розпадається з утворенням продукту регенерованого каталізатору.

Переваги методу:

- висока швидкість протікання процесу, що дозволяє скоротити розміри реактора;
- реалізація процесу при більш низьких температурах (300°С), ніж при спалюванні.

Недоліки методу:

– проблема активності і довголіття каталізатора (активність характеризується кількістю продукту, отриманого з одиниці обсягу каталізатора в одиницю часу);

– засмічення каталізатора твердими частками, що містяться зазвичай в газі, що очищується;

– можливість отруєння каталізатора декількома газоподібними домішками, що містяться у викидах.

Методи підбору каталізаторів базуються на основі емпіричних або напівемпіричних засобів.

Для здійснення каталітичного процесу необхідні невеликі кількості каталізатору, розташованого таким чином, щоб забезпечити максимальну поверхню контакту з газовим потоком. Шар каталізатору повинен створювати відносно низький перепад тиску, бути довговічним.

У більшості випадків каталізаторами можуть бути такі метали, як платина, паладій та їх сполуки, а також окиси міді та марганцю.

Каталітична маса зазвичай виконується у формі шарів, кілець, пластин або проволоки, що скручена у спіраль (з ніхрому, нікелю, окису алюмінію) з нанесеним на їх поверхню тонким шаром каталізатора.

Каталітична очистка використовується для вловлювання із газів органічних сполук, окису вуглецю, видалення неприємних запахів біологічного походження, в газоочистках систем нанесення лакових покриттів, очищення викидів автомобілів.

Головні вимоги до каталітичних реакторів:

– висока виробнича здатність;

– економічність у виготовленні та експлуатації;

– можливість автоматизації;

– наявність пристроїв підігрівання газу і рекуперації тепла.

За способом контакту газів з каталізатором, апарати поділяють на три групи:

– реактори з фільтруючим шаром каталізатора;

- реактори з завислим (киплячим) шаром каталізатора,
- реактори з пилоподібним каталізатором.

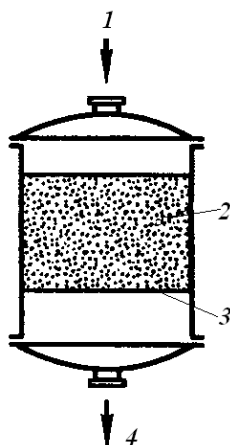


Рисунок 4.29 – Реактор з фільтруючим шаром:

- 1 – вхід газу на очистку; 2 – нерухомий шар каталізатора;
- 3 – перфоровані ґрати; 4 – вихід очищеного газу

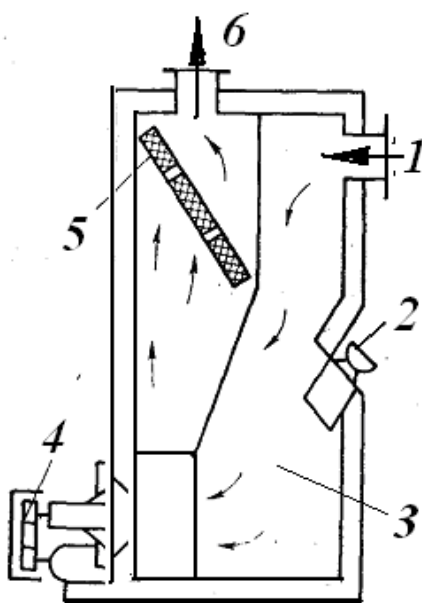


Рисунок 4.30 – Каталітичний реактор без теплообміну:

- 1 – вхід газу на очистку;
- 2 – пальник;
- 3 – підігрівач;
- 4 – вентилятор;
- 5 – касета з каталізатором;
- 6 – вихід очищеного газу

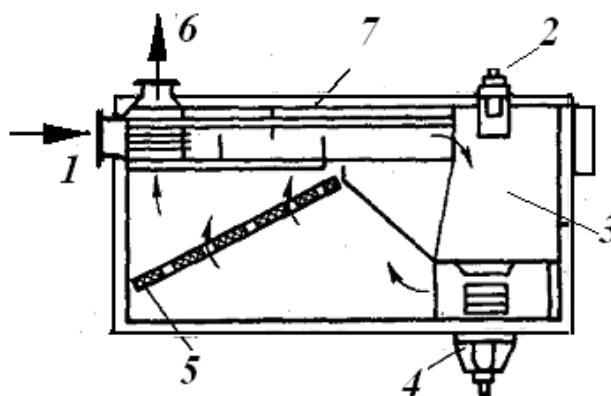


Рисунок 4.31 – Каталітичний реактор з внутрішнім теплообміном:

- 1 – вхід газу на очистку; 2 – пальник;
- 3 – підігрівач; 4 – вентилятор;
- 5 – касета з каталізатором; 6 – вихід очищеного газу;
- 7 – рекуператор

Каталітичні реактори з фільтруючим шаром в залежності від функціонального призначення можуть мати декілька варіантів конструкційного оформлення. Найбільш перспективними є апарати, у яких в одному корпусі розташовані підігрівач, контактний вузол (каталізатор) і рекуператор тепла (рис.4.31).

Повітря, що містить шкідливі домішки, спрямовують у теплообмінник-рекуператор, звідки від поступає в підігрівач. Продукти згоряння природного газу, що спалюється у пальнику, підігрівають повітря, що очищується, до необхідної температури, що забезпечує оптимальну швидкість окислення шкідливої домішки на поверхні каталізатора. Суміш повітря і продуктів згоряння проходить через теплообмінник-рекуператор, де віддає своє тепло газам, що подаються на очистку, і через патрубок викидається в атмосферу.

Перевага апаратів з фільтруючим шаром – це простота конструкції. До недоліків варто віднести: наявність ділянок, що погано омиваються газом у місцях дотику гранул каталізатора, відсутність теплообміну, а також можливість забруднення каталізатора твердими частками.

Переваги реакторів з киплячим шаром – гарна теплопровідність шару, можливість механізації процесу завантаження – розвантаження каталізатору, відсутність локальних перегрівів у шарі каталізатору, можливість використання дрібних зерен. Однак до каталізатору пред'являються підвищені вимоги до міцності, тому що у завислому шарі йде інтенсивне стирання та унесення пиловидного каталізатора.

В реакторах з пилоподібним каталізатором подрібнений каталізатор розпилюється у робочу частину за допомогою спеціальних сопел. Реакція протікає у час знаходження часток каталізатора у польоті. При цьому відбувається більш повне використання реакційного об'єму апарату.

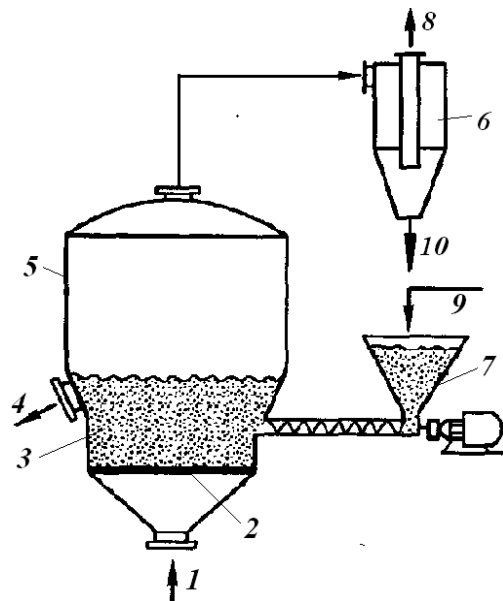


Рисунок 4.32 – Реактор з киплячим шаром каталізатора:

1 – вхід газу на очистку; 2 – газорозподільна решітка; 3 – киплячий шар каталізатора; 4 – вивід відпрацьованого каталізатора; 5 – циліндричний корпус; 6 – циклон; 7 – шнековий пристрій; 8 – вихід очищеного газу; 9 – ввід свіжого каталізатора; 10 – повертання вловленого каталізатора

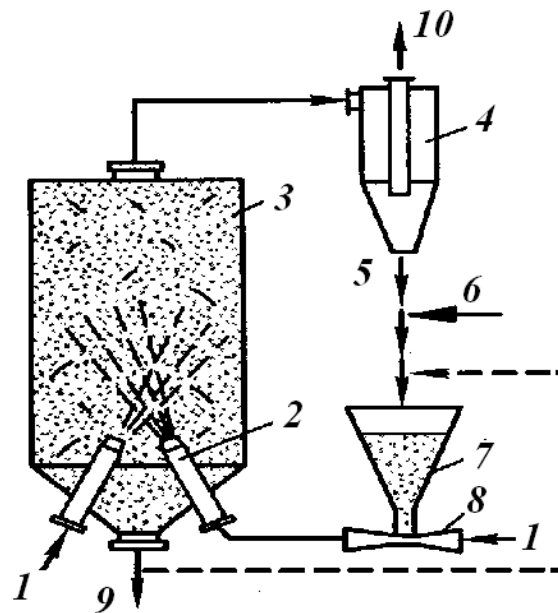


Рисунок 4.33 – Реактор з пилоподібним каталізатором:

1 – вхід газу на очистку; 2 – сопло; 3 – циліндричний корпус; 4 – циклон; 5 – повертання вловленого каталізатору; 6 – вхід свіжого каталізатора; 7 – бункер; 8 – ежектор; 9 – виведення відпрацьованого каталізатору; 10 – вихід очищеного газу.

4.4.6 Біохімічна очистка газів

Біохімічну очистку використовують для дезодорації повітря, видалення з газів домішок аміаку, формальдегіду, фенолу і сполук сірки і азоту.

Біохімічні методи використовують для очистки газів постійного складу. При частих змінах складу газу мікроорганізми не встигають адаптуватися до нових речовин і виробляють недостатню кількість ферментів.

Високий ефект газоочистки досягається за умови, що швидкість біохімічного окислення вловлених речовин більше за швидкість їх надходження із газової фази.

Існує дві групи апаратів біохімічної очистки газів: біоскрубери та біофільтри.

Біоскрубери – це сорбційні апарати, в яких рідиною для зрошування виступає водна суспензія активного мулу. Шкідливі речовини, що містяться у забрудненому газі, вловлюються зрошуючою рідиною і розкладаються мікроорганізмами активного мулу. Оскільки біологічні процеси протікають з невеликою швидкістю, для забезпечення процесу в газоочистці потрібна досить об'ємна проміжна ємність.

В біофільтрах очищуемий газ пропускають через шар фільтра-насадки, що зрошується водою для створення необхідної вологості, яка є достатньою для підтримання життєдіяльності мікроорганізмів. У якості насадки використовують ґрунт, торф, компост і інші природні або штучні матеріали.

Ефективна очистка в біофільтрах забезпечується за наступних умов:

$$- \frac{БПК}{ХПК} \geq 0,5 \quad \frac{(біологічна потреба у кисні)}{(хімічна потреба у кисні при окисненні до CO_2 \text{ и } H_2O)}$$

- рівномірний розподіл повітря по всій поверхні фільтра;
- волога фільтруючого шару 20–50 %;
- температура 25–35 °С, рН = 6,5–8,5.

4.4.7 Зниження токсичних викидів від автотранспорту

До головних токсичних викидів автомобіля відносяться відпрацьовані гази, картерні гази і паливні випаровування. Відпрацьовані гази, що викидаються двигуном, містять окис вуглецю (CO), вуглеводні (C_mH_n), окиси азоту (NO_x). бенз(а)пірен, альдегіди і сажу.

Картерні гази – це суміш частини відпрацьованих газів, яка поступає внаслідок поганої щільності поршневих кілець в картер двигуна, з парами моторного мастила. Паливні випаровування поступають у довкілля з системи живлення двигуна: стиків, шлангів та ін. Розподіл головних компонентів викидів у карбюраторного двигуна наступний:

- відпрацьовані гази – 95 % CO, 55 % C_mH_n та 98 % NO_x ;
- картерні гази – 5 % CO, 5 % C_mH_n , 2 % NO_x ;
- випари палива – до 40 % C_mH_n .

Підвищення екологічних показників автомобіля можливе за рахунок наступних заходів:

- підвищення економічності двигуна і автомобіля;
- заміна бензинових двигунів на дизельні;
- переведення двигунів на використання альтернативних видів палива;
- вдосконалення режиму роботи і технічного обслуговування;
- використання нейтралізаторів.

Підвищення економічності двигунів досягається головним чином за рахунок вдосконалення процесу спалювання палива:

- пошарове спалювання палива;
- використання підігріву і випаровування у впускному тракті;
- використання електронного запалювання.

Підвищення економічності автомобіля досягається за рахунок:

- зниження ваги автомобіля;
- поліпшення аеродинамічних показників кузова;
- зниження опору повітряних фільтрів та глушників;

– зниження ваги палива та інструментів, що перевозяться.

Дизельний двигун має при аналогічній потужності витрату палива на 20–30 % меншу за карбюраторний ДВС.

Економічні переваги у порівнянні з бензиновими мають двигуни, що працюють на природному газі. При цьому викиди CO зменшуються на 40 %, викиди NO_x на 26 %. Однак подібна заміна палива зменшує вантажну здатність і запас ходу: падіння потужності двигуна при зміні бензину на пропан складає 6 %, на метан – 11 %.

Нейтралізатор – це додатковий пристрій у випускній системі двигуна для зменшення токсичності відпрацьованих газів.

Нейтралізатори можуть бути рідинні, каталітичні та фільтри.

Принцип дії рідинних нейтралізаторів заснований на розчиненні або хімічній взаємодії токсичних компонентів при пропусканні їх через рідину визначеного складу.

Варіант схеми рідинного нейтралізатора наведений на рисунку 4.34.

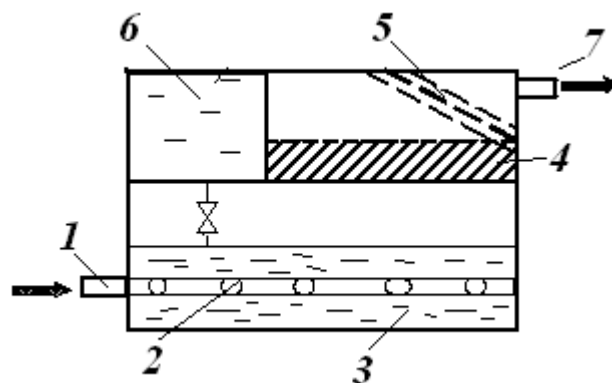


Рисунок 4.34 – Схема рідинного нейтралізатора:

- 1 – вхід відпрацьованих газів; 2 – колектор; 3 – робоча рідина; 4 – фільтр;
5 – сепаратор; 6 – ємність з робочою рідиною; 7 – вихід очищеного газу

Відпрацьовані газы поступають в нейтралізатор по трубі і через колектор поступають в бак, де реагують з робочою рідиною. Очищені газы проходять через фільтр, сепаратор і викидаються в атмосферу. По мірі випаровування рідина доливається у робочий бак з ємності.

Пропускання відпрацьованих газів дизелів через воду призводить до зменшення запаху, альдегіди поглинаються з ефективністю 0,5, ефективність очистки від сажі досягає 0,6–0,8.

Недоліки рідинних нейтралізаторів:

- необхідність частої зміни робочого розчину;
- велика маса і габарити;
- неефективність вловлювання NO_x (до 30 %);
- великі втрати рідини від випаровування.

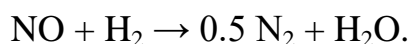
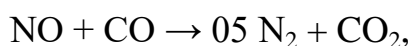
МАЗ нейтралізатор, що використовується для дизельних самосвалів, являє собою металеву зварену конструкцію прямокутної форми висотою 530 мм, шириною – 600 мм, містить у баці 55 л робочого розчину.

Каталітична нейтралізація відпрацьованих газів ДВЗ на поверхні твердого каталізатора відбувається за рахунок хімічної трансформації (реакцій окиснення і відновлення) в результаті яких утворюються нешкідливі або менш шкідливі для навколишнього середовища і здоров'я людини сполуки.

Найбільш поширеними є каталізатори з благородних металів: платини, паладію, рутенію, родію. Ці каталізатори характеризуються гарною селективністю, низькою температурою початку ефективної роботи, достатньою температуростійкістю, довго тривалістю, стійкою роботою при високих швидкостях газового потоку. Головний недолік – висока вартість.

Для нейтралізації у відпрацьованих газах NO_x , CO , C_mH_n використовують двоступеневий каталітичний нейтралізатор.

Двоступеневий каталітичний нейтралізатор складається з послідовно з'єднаних відновлюючого (1) і окислюючого (2) нейтралізаторів. Відпрацьовані гази через патрубок 3 поступають на відновлюючий каталізатор 1, де проходить нейтралізація окисів азоту:



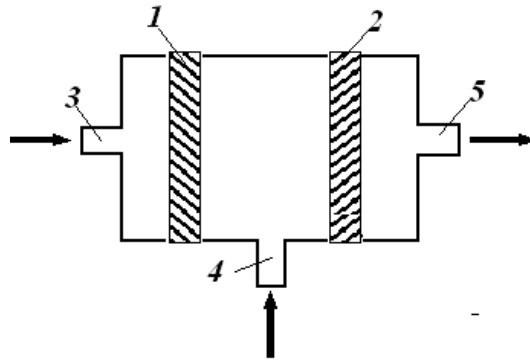
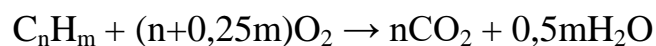


Рисунок 4.35 – Схема каталітичного нейтралізатора:

1 – відновлюючий нейтралізатор; 2 – окиснюючий нейтралізатор; 3 – вхід відпрацьованих газів; 4 – вхід повітря на окиснення; 5 – вихід очищених газів

Після відновлюючого каталізатора до відпрацьованих газів для створення окислюючого середовища через патрубок (4) підводиться атмосферне повітря. На окислюючому каталізаторі відбувається нейтралізація продуктів неповного згоряння:



Нейтралізатори, що нині існують, знижують концентрацію CO і C_mH_n на 70–90 % і 50–85 % відповідно.

Каталітичний нейтралізатор для автобуса має наступні параметри:

- об'єм реактора – 2,5 дм³;
- габарити, м – 0,55 × 0,30 × 0,25;
- вага – 15 кг.

Для вловлювання часток сажі з відпрацьованих газів дизельних двигунів використовують сажеві фільтри.

Фільтр – це сотоподібна конструкція з вічками прямокутної форми. Матеріал фільтру – поруватий кордієрит – має достатню механічну міцність, стійкість до агресивних хімічних речовин, опір до оплавлення і утворення тріщин при теплових впливах.

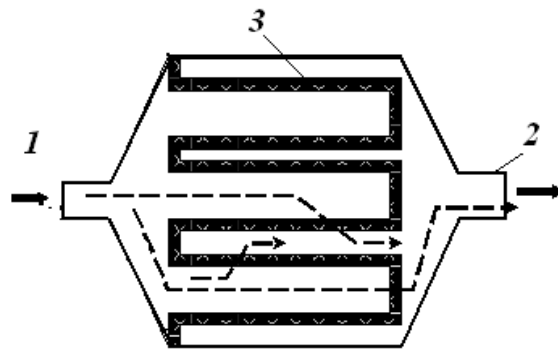


Рисунок 4.36 – Схема сажевого фільтру:

1 – вхід газів; 2 – вихід газів; 3 – фільтруючий матеріал

Частки, що накопичуються у фільтрі, слід періодично видаляти, наприклад, термічним окисненням. Для цього підходящі гази нагрівають до 450 °С або вище, що призводить до загоряння і вигорання сажі, що накопичена.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Экология города / Под ред. Ф. В. Стольберга. – Киев : Либра, 2000. – 464 с.
2. Джигирей В. С. Екологія та охорона навколишнього середовища : навч. посіб. / В. С. Джигирей. – Київ : Знання, 2002. – 203 с.
3. Ратушняк Г. С. Технічні засоби очищення газових викидів : навч. посіб. / Г. С. Ратушняк, О. Г. Лялюк. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 158 с.

Навчальне видання

БЕКЕТОВ Володимир Єгорович,
ЛОМАКІНА Ольга Сергіївна,
ЄВТУХОВА Галина Петрівна

ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності 101 – Екологія)*

Відповідальний за випуск *Д. В. Дядін*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *О. С. Ломакіна*

План 2021, поз 45Л

Підп. до друку 13.01.2023. Формат 60 × 84/16.
Електронне видання. Ум. друк арк. 7,4

Видавець та виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса office@kname.edu.ua.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.