

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

В. В. БЛАГОДАТНИЙ,
Н. І. МАГАСЬ,
Ю. М. ХАРИТОНОВ

АПАРАТИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ

Методичні вказівки

*Рекомендовано Методичною радою
ФТЕБ НУК*

Миколаїв
НУК
2019

УДК 504.5 (076)
Б68

Автори: *В. В. Благодатний*, канд. техн. наук, доц.;
Н. І. Магась, ст. викл.;
Ю. М. Харитонов, д-р техн. наук, проф.

Рецензент — *І. В. Ремешевська*, канд. техн. наук, доц.

Рекомендовано Методичною радою ФТЕБ НУК

Благодатний В. В.

Апарати для очищення повітря від забруднень : методичні вказівки /
Б68 В. В. Благодатний, Н. І. Магась, Ю. М. Харитонов. — Миколаїв : НУК
2019. — 52 с.

Розглянуті основні конструктивні типи апаратів сухого механічного пиловловлювання, фільтрації, мокрого пиловловлювання. Описано будову різних типів обладнання, призначеного для видалення з повітря газо- та пароподібних домішок: абсорберів, адсорберів, апаратів термічного і термokatалітичного знешкодження, засобів біологічного очищення.

Методичні вказівки рекомендуються для студентів спеціальностей «Екологія» та «Технології захисту навколишнього середовища» і можуть бути використані у курсовому та дипломному проектуванні за названими спеціальностями.

УДК 504.5 (076)

© Благодатний В. В., Магась Н. І., Харитонов Ю. М., 2019

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2019

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. АПАРАТИ СУХОГО МЕХАНІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ	7
1.1. Пилоосаджувальні камери	7
1.2. Інерційні пиловловлювачі	7
1.3. Циклони	9
1.4. Вихрові пиловловлювачі	12
1.5. Ротаційні пиловловлювачі	14
2. ЕЛЕКТРОФІЛЬТРИ	15
3. ФІЛЬТРИ	17
3.1. Тканинні фільтри	17
3.2. Волокнисті фільтри	19
3.3. Сіткові фільтри	22
3.4. Зернисті фільтри	23
4. СКРУБЕРИ	25
4.1. Поверхневі скрубери	26
4.2. Барботажні скрубери	29
4.3. Розпилювальні скрубери	31
5. АДСОРБЕРИ	35
6. ІОНООБМІННІ АПАРАТИ	39
7. КАТАЛІТИЧНІ РЕАКТОРИ	40
8. АПАРАТИ ТЕРМІЧНОГО ЗНЕШКОДЖЕННЯ	42
8.1. Топкові пристрої	42
8.2. Факельні пристрої	44
9. КОНДЕНСАТОРИ	45
10. БІОФІЛЬТРИ	46
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	49

ВСТУП

Функціонування сучасних виробництв та об'єктів невиробничої сфери призводить до постійного зростання обсягів і розширення номенклатури викидів шкідливих речовин в атмосферу. Такі речовини можуть мати різноманітний хімічний склад та перебувати у твердому, рідкому або газоподібному агрегатному стані. Тверді та рідкі частинки утворюють з повітрям двофазні системи, що мають назву аерозолів — пилу, димів і туманів. Газо- та пароподібні домішки, потрапляючи у повітря, розчиняються у ньому. При цьому й утворюються гомогенні суміші.

Забруднення в атмосфері можуть викидатися безперервно та періодично через спеціально обладнані пристрої відведення (організований викид) або безпосередньо від джерела (неорганізований викид). Поширюючись у повітрі, ці речовини можуть завдавати великої шкоди як екосистемам у цілому, так і здоров'ю людей зокрема. З метою запобігання негативним наслідкам забруднення атмосфери необхідно створювати спеціальні системи газоочищення. Очищення організованих технологічних викидів здійснюється за допомогою устаткування, що вмонтовується у відхідні газопроводи. Для очищення повітря від неорганізованих викидів застосовуються системи витяжної вентиляції, що складаються з відсмоктувачів, трубопроводів, вентиляторів та засобів газоочищення. Дотримання у приміщеннях комфортних та безпечних для життєдіяльності людини параметрів повітря забезпечується системами вентиляції та кондиціонування.

Основними елементами вказаних систем є засоби газоочищення, тобто видалення з газу забруднень або переведення останніх у безпечну для людини форму. Залежно від стану шкідливих домішок, що випускаються, розрізняють апарати для пиловловлювання, очищення від туманів та бризок, газоподібних, пароподібних домішок тощо. За принципом дії виділяють апарати для розділення неоднорідних систем, де визначальними є гідромеханічні процеси і, частково, теплові, а також масообмінні апарати, де очищення здійснюється переважно за рахунок масообмінних, хімічних та біохімічних процесів. Апарати бувають без-

перервної та періодичної дії, із застосуванням спеціального вловлювального агенту та без нього. У першому випадку поглинач може бути твердим, рідким або газоподібним, бути нерухомим або рухатися прямотечією, протитечією чи перехресною течією. Застосовуються також агрегати, до складу яких входить декілька секцій з різними принципами очищення. Класифікація засобів очищення повітря від забруднень наведена на рис. 1.

На теперішній час у техніці використовується велика кількість конструкцій апаратів газоочищення, в основному, з комбінованим принципом видалення шкідливих домішок. Сучасні системи, як правило, включають у себе декілька ступенів очищення, наприклад, попереднього вловлювання грубодисперсних частинок та остаточного вловлювання тонкодисперсних домішок. Очищенню від газоподібних домішок, як правило, передуює видалення пилу та туману.

У методичних вказівках надано опис конструкції та принципу роботи найпоширеніших газоочисних апаратів. Це дає змогу студентам засвоїти основні принципи розробки та функціонування техніки захисту повітряного середовища від забруднень та розбиратися у конструктивних особливостях сучасних апаратів, що відрізняються від описаних в основному наявністю додаткових регулювальних або розділювальних пристроїв.

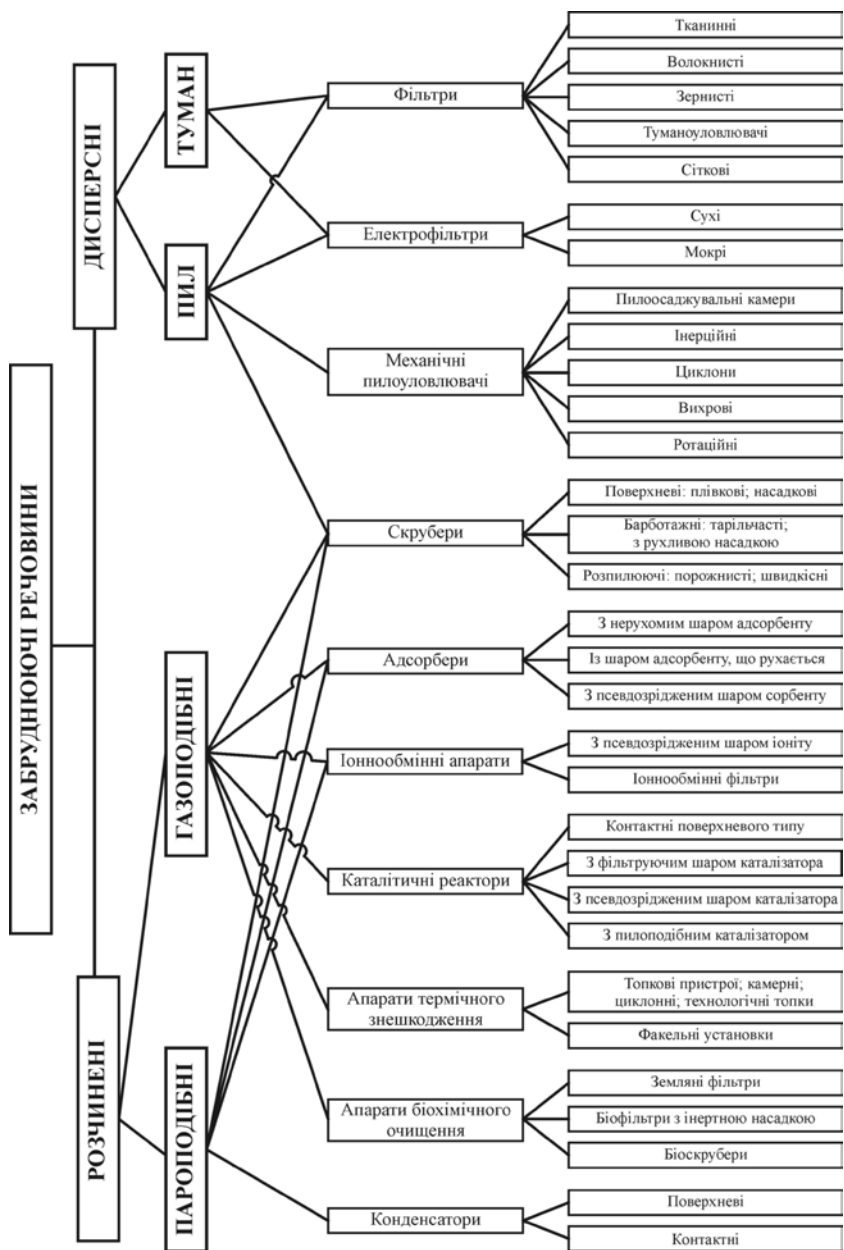


Рис. 1. Основні способи утилізації та рекуперації відходів

1. АПАРАТИ СУХОГО МЕХАНІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

1.1. Пилоосаджувальні камери

У пилоосаджувальних камерах відбувається гравітаційне осадження частинок під впливом гравітаційних і, частково, інерційних сил. Типовою конструкцією апаратів цього типу є прямокутний короб, у нижній частині якого розташований бункер для збирання пилу (рис. 2, а).

З метою зменшення висоти осадження частинок і, відповідно, підвищення ефективності їх уловлювання внутрішній об'єм камери розділяють на секції горизонтальними або похилими полицями (див. рис. 2, б). Для рівномірного газорозподілу по перерізу пилоосаджувальні камери можуть облаштовуватися дифузорами і газорозподільними ґратками. У деяких конструкціях пилоосаджувальних камер підвищення їхньої ефективності досягається за рахунок додаткового ефекту інерційного осадження частинок при обтіканні потоком газів ланцюгових або дровових завіс і відхиляючих перегородок (див. рис. 2, в, г).

Перевагою апаратів гравітаційного очищення є простота виготовлення та невеликий гідравлічний опір. Проте вони забезпечують уловлювання лише грубих частинок розміром не менше 50 мкм із загальним ступенем очищення до 40...50%. Необхідна ефективність очищення досягається за умови тривалого перебування частинок у пилоосаджувальній камері, тож швидкість газу повинна бути порівняно невеликою (0,2...1,5 м/с), а габарити камери — значними. Тому такі апарати використовують як перший ступінь газоочищення.

1.2. Інерційні пиловловлювачі

Видалення пилу в інерційних пиловловлювачах відбувається переважно за рахунок інерційних сил, що виникають унаслідок зміни напрямку руху газового потоку при обтіканні перегородок різної конфігурації, наприклад, вертикального відбивача (рис. 3, а) або плавного повороту потоку (див. рис. 3, б). Вплив інерційних сил на видалення

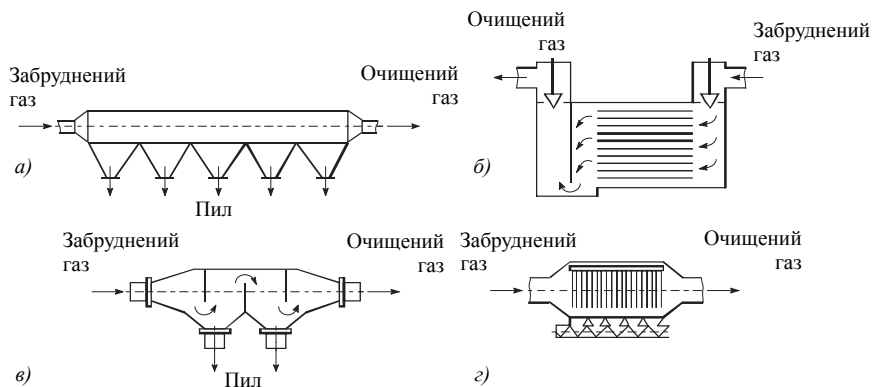


Рис. 2. Конструкції пилоосаджувальних камер

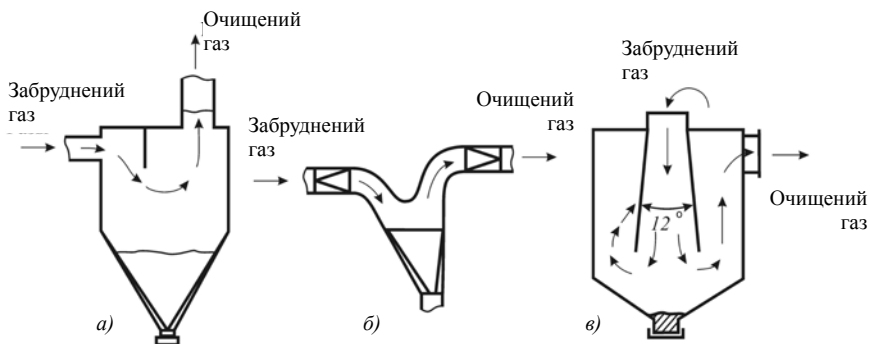


Рис. 3. Конструкції пилоосаджувальних камер

частинок у таких апаратах є значно більшим, ніж у пилоосаджувальних камерах із завісами та перегородками.

Іншими представниками цього класу пиловловлювачів є «пилові мішки» (див. рис. 3, в), що знайшли застосування у металургії. У такому апараті вхідна вертикальна труба надає частинкам додатковий до гравітаційної сили момент, який дорівнює приблизно $g/3$. Розроблено також апарати з боковим підведенням запиленого газу.

У жалюзійних пиловловлювачах механізм осадження частинок оснований на зміні напрямку руху запиленого газового потоку, що обтікає вбудовані у газохід або розташовані в окремому корпусі жалюзійні ґрати, які складаються з пластин, кілець, кутків та інших профілів (рис. 4).

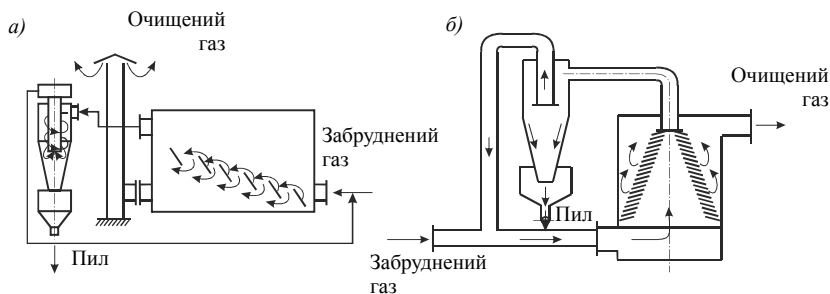


Рис. 4. Жалюзійні пиловловлювачі: *а* — з пластинчастими жалюзі; *б* — з кільцевими жалюзі

Пилогазовий потік, проходячи між ними, розбивається на тонкі струминки, які здійснюють поворот. При цьому великі та пружні частинки пилу відскакують від жалюзі і зміщуються до стінок або центральної частини (якщо жалюзі мають конічну форму) газоходу або апарата. Звідти вони відводяться у циклон і, пройшовши там очищення, повертаються до основного потоку. Частка газу, що містить основну частину пилу та очищується у циклоні, складає 10...20 % від загальної.

У порівнянні з гравітаційними ці апарати мають вищу швидкість газового потоку (10...15 м/с), а відтак і менші габарити, але й більший гідравлічний опір. Вони здатні уловлювати частинки меншого розміру (20...30 мкм), мають вищу ефективність, проте, порівняно з потрібною, недостатню. Тому інерційні пиловловлювачі застосовуються або для попереднього очищення газів, або для видалення грубих фракцій аерозолів у тому випадку, коли більш ефективні уловлювачі неможливо встановити за браком місця.

1.3. Циклони

Циклони є різновидом інерційних пиловловлювачів, де очищення газів здійснюється переважно під дією відцентрових сил. Ці сили виникають при обертальному русі газового потоку, що створюється за тангенціально розташованого вхідного патрубку, спірального підведення або криволінійного напрямного апарата. Закручений газовий потік опускається вниз по кільцевому простору між циліндричною частиною циклона та вихлопною трубою до його конічної частини. Під дією відцентрових сил частинки пилу відкидаються до стінок корпусу і випадають з потоку. Чистий газ, продовжуючи обертатися, здійснює поворот

на 180° і виходить із циклона через розташовану по осі вихлопну трубу. Частинки пилу, які досягли стінок корпусу, під дією осьового потоку та сил тяжіння рухаються у напрямку до вихідного отвору корпусу і під впливом сил інерції виводяться у бункер.

На сьогодні у вітчизняній техніці пиловловлювання найпоширенішими є циклони НПОГазу. Залежно від співвідношення між висотою їхніх складових частин ці апарати можна поділити на циліндричні (рис. 5, а) та конічні (див. рис. 5, б). Циліндричні циклони за рівної продуктивності мають істотно менший гідравлічний опір, а отже потребують менших експлуатаційних витрат у порівнянні з конічними. У той же час конічні циклони забезпечують вищу ефективність очищення.

Для очищення відхідних газів від абразивного пилу використовуються циклони зі зворотним конусом (див. рис. 5, в), який розширюється до основи, з метою запобігти приставанню пилу до стінок апарата. У нижній його частині встановлюється внутрішній конус, призначений для організації відведення повітря у бункер та запобігання унесенню вловленого пилу.

З метою одночасного зниження гідравлічного опору і габаритів були розроблені прямоструминні циклони (рис. 6), де вхід і вихід газу здійснюються з протилежних боків, а закручування потоку досягається за

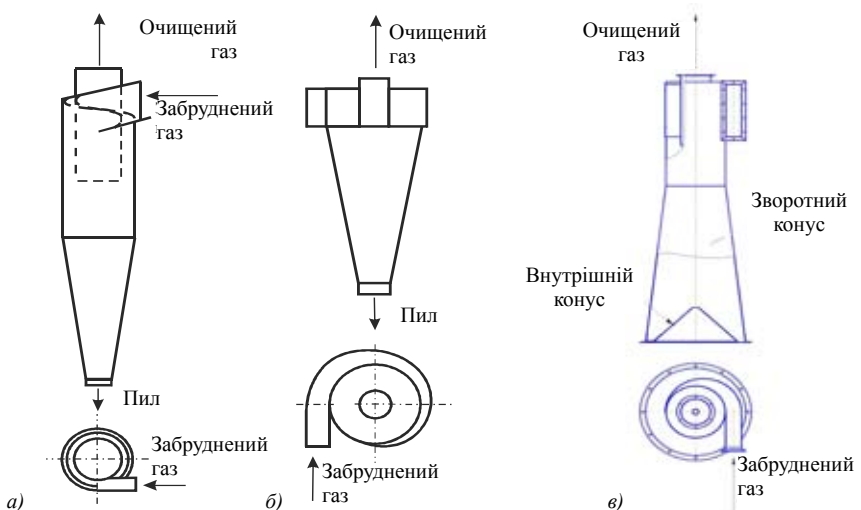


Рис. 5. Основні схеми циклонів: а — циліндричні; б — конічні; в — зі зворотним конусом

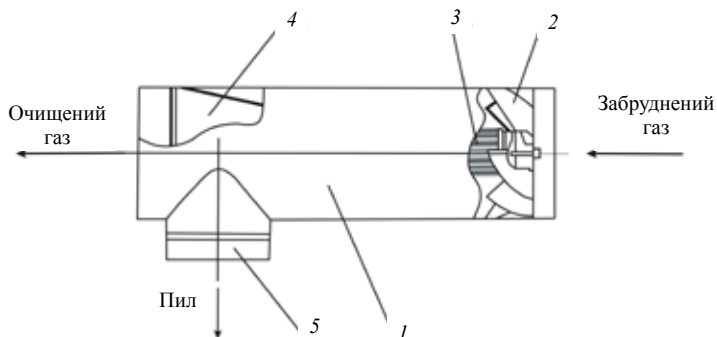


Рис. 6. Прямоструминний циклон ЦП

допомогою спеціального закручувального пристрою 2. Для видалення частинок пилу, які під дією відцентрової сили переміщуються до внутрішньої поверхні корпусу 1, передбачено патрубок 5. Додаткове очищення газів від пилу з метою підвищення ефективності апарата здійснюється у жалюзійних ґратах 3. Очищене повітря прямує у газохід через вихідний конус 4. Існують також вертикальні апарати з тангенціальним підведенням забрудненого повітря. Ефективність прямоструминних циклонів є невеликою, тож їх використовують як перший ступінь очищення.

При великих витратах газів застосовують групові циклони, що включають у себе декілька циклонів 1 зі спільними колекторами підведення 2 та відведення газу 3, а також бункером 4 (рис. 7). Компонування циклонів може бути прямокутним або коловим.

Ефективність циклонів досить висока і підвищується зі зменшення діаметра, тому широко використовують батарейні циклони з багатьма десятками паралельних циклонів малого діаметра, розташованими в одному корпусі зі спільним підведенням і відведенням газу (рис. 8). Циклонні елементи можуть бути з аксіальною подачею і закручувальним апаратом, тангенціальною подачею чи прямоструминними. Забруднений газ потрапляє у розподільну камеру 1, а звідти — аксіально через напрямний апарат 2, як на рис. 8, або іншим способом — до циклонних елементів 3. В останніх відбувається видалення частинок пилу в бункер 4, а очищений газ по центральних трубах виводиться у камеру 5 і далі через вихідний патрубок виходить із циклона.

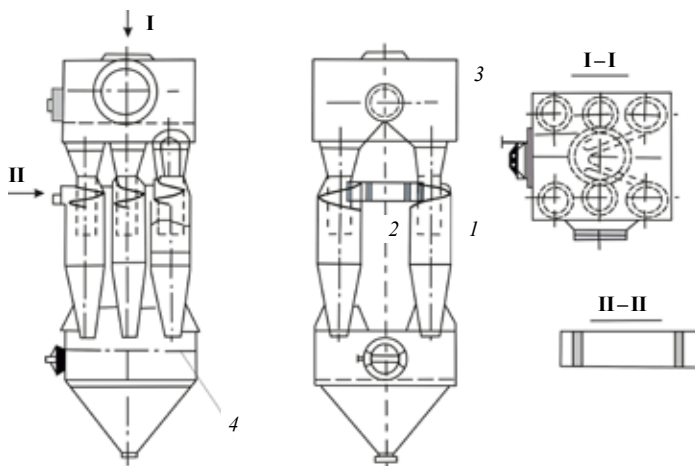


Рис. 7. Схема групового циклона прямокутного компонування

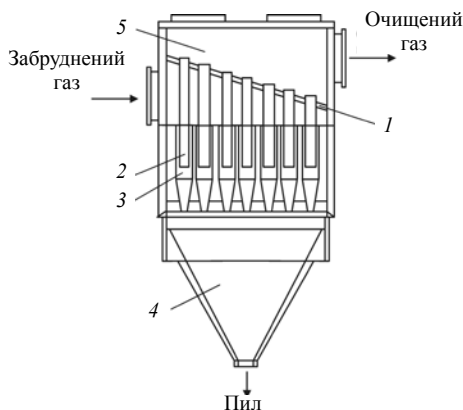


Рис. 8. Батарейний циклон з аксіальною подачею газу

1.4. Вихрові пиловловлювачі

Вихрові пиловловлювачі відрізняються від циклонів наявністю допоміжного закрученого газового потоку. Він створюється шляхом подачі через сопла 3 (рис. 9, а) або лопатки 8 (див. рис. 9, б) вторинного повітря: атмосферного повітря, частини очищеного газу або запилених газів. Економічнішим є останній варіант, оскільки дозволяє значно підвищити продуктивність апарата без суттєвого зниження ефективності очищення.

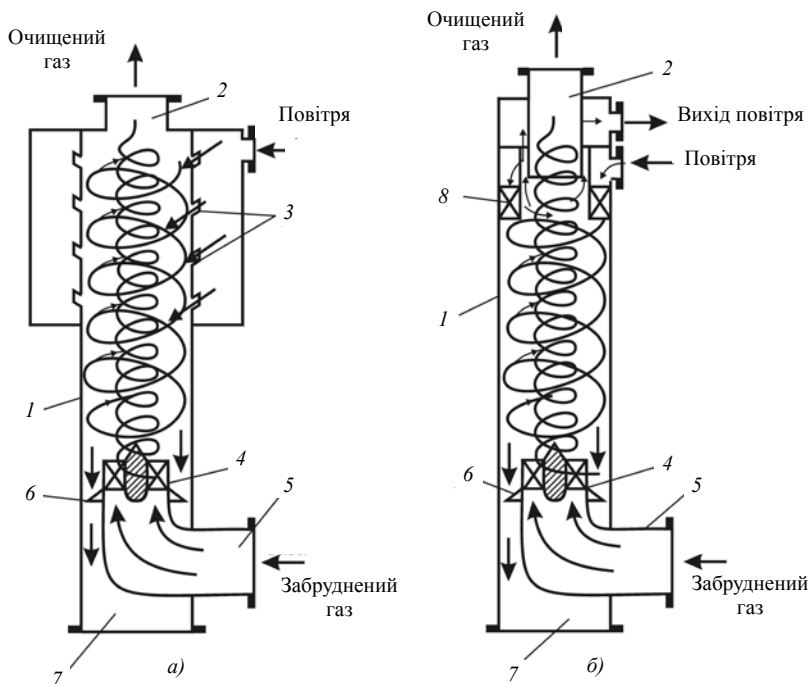


Рис. 9. Вихрові пиловловлювачі: *а* — соплового типу; *б* — лопаткового типу

Запилений газ надходить у вихровий пиловловлювач через вхідний патрубок 5 і спочатку закручується лопатковим завихрювачем 4, а далі підіймається по циліндричній трубі 1 вгору, де стикається зі струменями вторинного повітря. У результаті частинки пилу спочатку відкидаються до периферії, а потім потрапляють до спірального потоку вторинного газу та опускаються у нижню частину апарата 7, а потім у бункер. Очищене повітря видаляється через вихідний патрубок 2. Для запобігання поверненню пилу до газового потоку на вході у бункер встановлюють підпірну шайбу 6.

Вихрові пиловловлювачі мають вищу ефективність очищення повітря від фракцій пилу $< 3 \dots 5$ мкм, ніж циклони, у них практично відсутнє абразивне зношення внутрішніх поверхонь. Ці апарати краще піддаються регулюванню і дозволяють очищувати гази вищої температури (якщо як вторинне повітря використовується атмосферне), однак потребують більших витрат енергії та є складнішими в експлуатації.

1.5. Ротаційні пиловловлювачі

Особливістю ротаційних пилоуловлювачів є вплив на процес очищення крім відцентрових сил також сил Коріоліса, що виникають при обертанні робочого колеса вентилятора (рис. 10, *а*) або порожнинного ротора (див. рис. 10, *б*). У апаратах першої групи (див. рис. 10, *а*) напрямок частинок, що видаляються, збігається з напрямком руху газу. Запилений газ потрапляє у центральну частину обертового робочого колеса, розташованого у спіралеподібному кожусі. При обертанні колеса частинки під впливом названих сил відкидаються до стінок кожуха і відводяться через спеціальний патрубок, а очищений газ виходить через патрубок чистого повітря. В апаратах другої групи (див. рис. 10, *б*) напрямок частинок, що видаляються, і напрямок руху газу протилежні. У процесі обертання ротора з перфорованою боковою поверхнею частинки пилу відкидаються від неї у радіальному напрямку і видаляються з апарата. Очищений газ всмоктується всередину ротора і робочим колесом вентилятора спрямовується у вихідний патрубок.

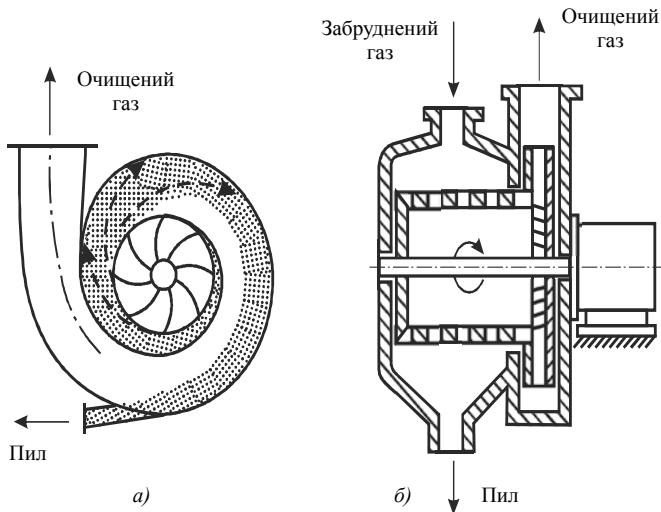


Рис. 10. Ротаційні пиловловлювачі: *а* — вентиляторний; *б* — протиструминний

2. ЕЛЕКТРОФІЛЬТРИ

Дія електрофільтрів оснований на електростатичному осадженні шкідливих речовин унаслідок пропускання між коронуючим та осаджувальним електродом постійного струму високої напруги. При цьому газ іонізується, частинки пилу також набувають заряду і рухаються в напрямку осаджувального електроду, де розряджаються та осідають. Потім електроди очищуються від пилу струшуванням або змиванням. Для ефективного осадження потрібне неоднорідне електричне поле, для чого коронуючий електрод виготовляють у вигляді дроту різного профілю, а осаджувальний — у вигляді труб або пластин різної конфігурації. Електрофільтри (рис. 11) включають у себе порівняно велику кількість електродів, тому для рівномірного розподілу повітря між ними потрібні спеціальні пристрої.

Електрофільтри поділяються на однозонні, де зарядження та осадження частинок відбувається в одній зоні, та двозонні, де ці процеси йдуть окремо в іонізаторі та осаджувачі (рис. 11, *а*).

В однозонних фільтрах процеси зарядження й осадження відбуваються у просторі між коронуючими 2 та трубчастими (див. рис. 11, *б*) або пластинчастими (див. рис. 11, *в*) осаджувальними 3 електродами, в якому забруднений газ розподіляється за допомогою ґрат 1 або лопаток 6. Газ може рухатися у вертикальному (див. рис. 11, *б*) або горизонтальному (див. рис. 11, *в*) напрямку. В останньому випадку він може послідовно проходити декілька електричних полів. За засобом видалення осаджених частинок електрофільтри поділяються на сухі (див. рис. 11, *в*), у яких забруднення видаляються за допомогою струшувального пристрою 4, та мокрі (див. рис. 11, *в*), коли вони змиваються зрошувальною рідиною 5. Залежно від кількості паралельно працюючих секцій електрофільтри можуть бути одно- і багатосекційними.

Сухі електрофільтри дозволяють уловлювати тверді частинки, а мокрі — як тверді, так і рідкі — туман чи крапельну вологу будь-яких розмірів з високою ефективністю до 90 %, а у деяких випадках до 99,9 %.

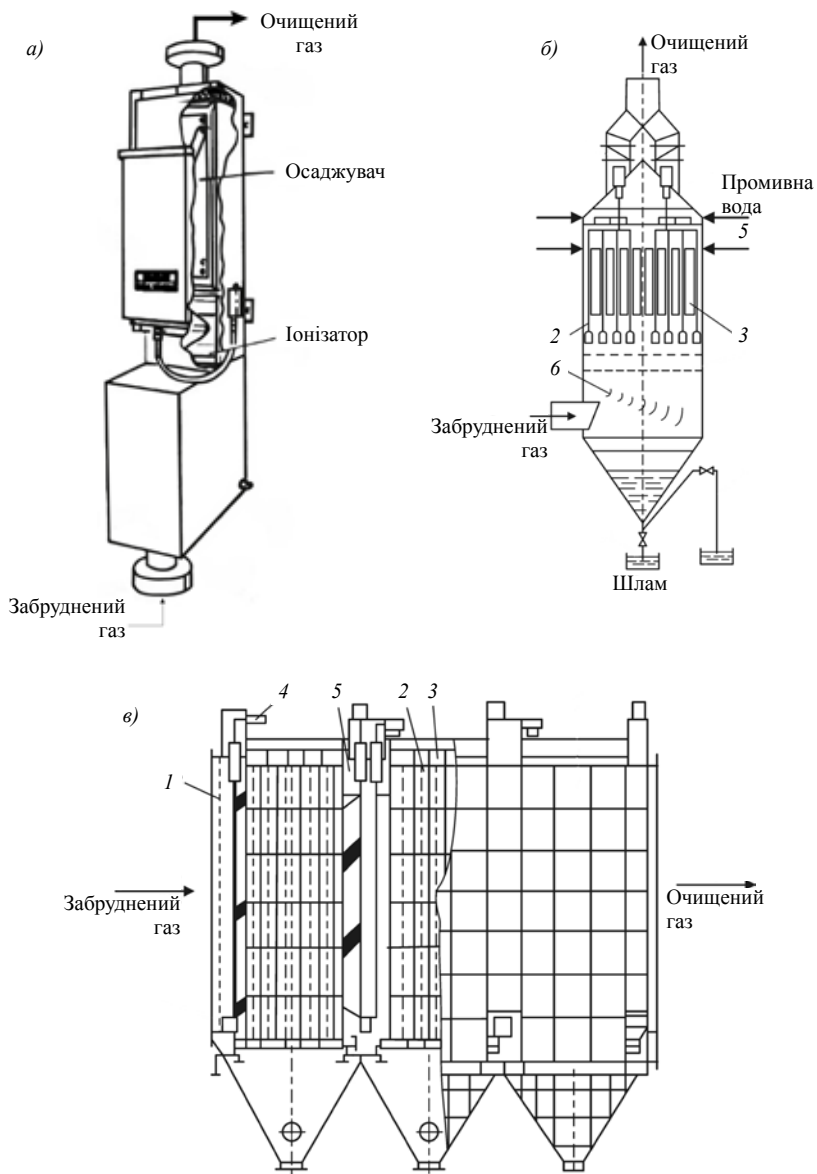


Рис. 11. Електрофільтри: *а* — двухзонный; *б* — однозонный трубчастый вертикальный; *в* — однозонный пластинчастый горизонтальный

3. ФІЛЬТРИ

Сучасні фільтри умовно поділяють на три класи. Фільтри тонкого очищення уловлюють з високою ($> 99\%$) ефективністю субмікронні частинки з низькою ($< 1 \text{ мг/м}^3$) вхідною концентрацією, мають малу швидкість фільтрації, не регенеруються. Повітряні фільтри застосовують у системах вентиляції і кондиціонування повітря при концентрації пилу до 50 мг/м^3 і високих швидкостях фільтрації, можуть підлягати або не підлягати регенерації. Промислові фільтри використовують для очищення промислових газів концентрацією до 60 г/м^3 , регенеруються.

Фільтрувальні пористі перегородки поділяються на гнучкі, напівжорсткі та жорсткі, крім того застосовуються зернисті шари матеріалів.

3.1. Тканинні фільтри

Фільтри з гнучкими пористими перегородками є найбільш поширеними з промислових фільтрів. Вони класифікуються за такими ознаками:

- за формою тканинних фільтроелементів та наявністю опорних пристроїв;
- за тиском у апараті: під розрідженням і під тиском;
- за засобом регенерації тканини: струшуванням, зворотнім продуванням, віброзрушуванням, імпульсивним продуванням стислим повітрям;
- за кількістю секцій установки: однокамерні та багатокамерні;
- за видом тканини: бавовняні, нітронові, вовняні, лавсанові, скло-тканинні тощо;
- за типом фільтрувального матеріалу: звичайні тканини та повсті.

Найбільш поширеними є рукавні фільтри (рис. 12, а), що мають багато секцій, які поперемінно працюють у режимах фільтрування та регенерації. Рукави 1 розміщені у механічному корпусі 2 таким чином, що верхні їхні кінці заглушені та підвішені до рами. Забруднене повітря надходить через патрубков у нижню частину апарата, фільтрується крізь стінки рукавів, проходить у збірний колектор 4 і далі на викид. Пил, що осідає на рукавах, видаляється у режимі регенерації шляхом струшування рами за допомогою спеціального механізму 3 або зворотного

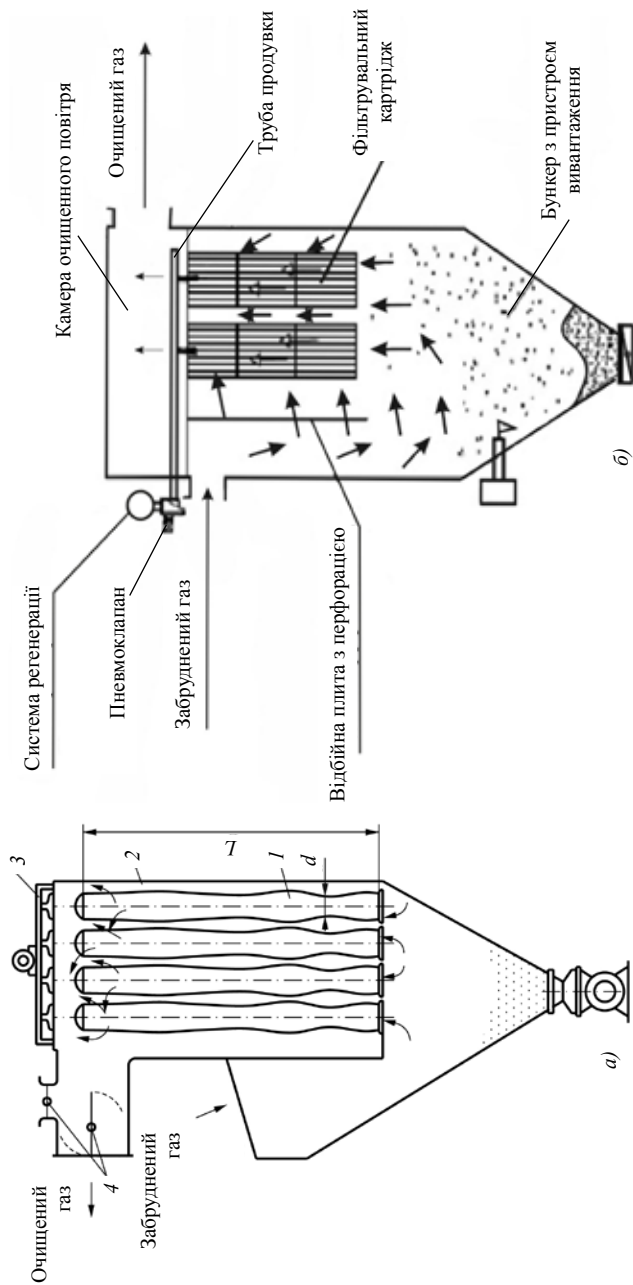


Рис. 12. Текстильні фільтри. *a* — рукавний; *б* — картриджний

продування стислим повітрям. Згодом пил потрапляє до бункерів, звідки вивантажується шнековим механізмом.

Картриджні (касетні, патронні) фільтри (див. рис. 12, б) є ефективнішими у порівнянні з рукавними з точки зору очищення повітря від будь-якого дрібнодисперсного сухого пилу. Їхніми фільтрувальними елементами слугують картриджі (касети, патрони) циліндричної форми. Запилене повітря надходить у картриджний фільтр через патрубок і спрямовується до камери «запиленого» повітря. Частина пилу осаджується у бункері внаслідок різкої зміни напрямку руху газопилового потоку, що оминає відбійну плиту. Решта пилу проходить через фільтрувальні картриджі, причому частинки пилу затримуються на їхній зовнішній поверхні, а очищене повітря надходить до камери «чистого» повітря та відводиться з фільтра.

Уловлені у процесі проходження запиленого газу крізь фільтрувальну тканину тверді частинки поступово зчіплюються одна з одною і разом з волокнами тканини утворюють пористу перегородку, яка забезпечує разом високий ступінь очищення газу. Тому тканинні фільтри доцільно використовувати як завершальні ступені установок пиловловлювання.

3.2. Волокнисті фільтри

Волокнисті фільтри, на відміну від тканинних, є фільтрами об'ємної дії, що розраховані на уловлювання частинок здебільшого по всій глибині шарів різної товщини, де однорідно розподілені волокна. Їх умовно поділяють на тонковолокнисті, глибокі та грубоволокнисті.

До волокнистих фільтрів належать фільтри тонкого очищення (HEPA, ULPA). Найбільшого поширення з тонковолокнистих фільтрів набули апарати рамної конструкції (рис. 13, а). Стрічку фільтрувального матеріалу 4 укладають між П-подібними пластинами 1, які розміщені по висоті апарата поперемінно відкритими та закритими сторонами по відношенню до руху газу. Для запобігання злипанню стрічки між її шарами встановлюють гофровані роздільники 3. Забруднені гази поступають з відкритого боку фільтра, проходять крізь матеріал та виходять з протилежного боку. Часто апарати включають у себе передфільтр з грубоволокнистого матеріалу 5 (див. рис. 13, б), що дозволяє збільшити час їх роботи (комбіновані фільтри). З тією ж метою глибокі фільтри виконують багат шаровими, з тонкого шару грубих волокон і більш тонкого замикаючого шару тонких волокон зі змінною щільністю упакування.

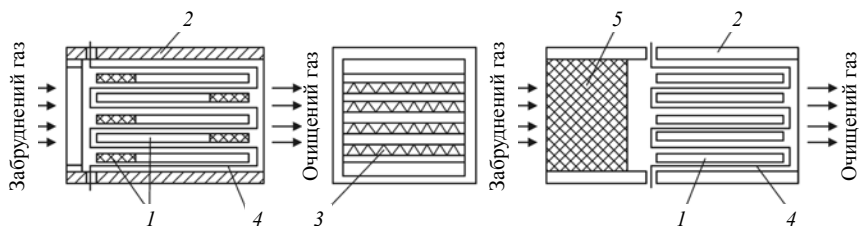


Рис. 13. Фільтри тонкого очищення: *а* — рамний; *б* — комбінований

Грубоволокнисті фільтри (лавсанові або скловолокнисті) є промисловими фільтрами, мають високу пилоємність, низький гідравлічний опір і здатні уловлювати субмікронні частинки після часткового забивання.

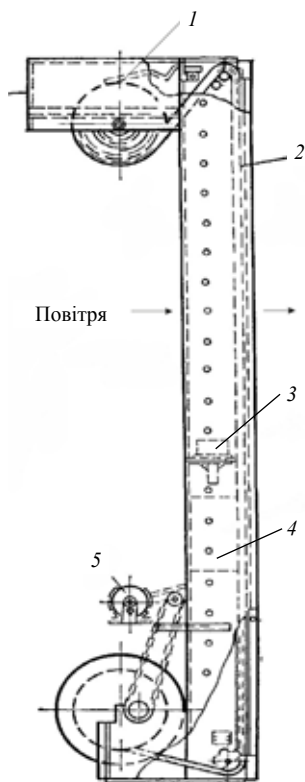


Рис. 14. Рулонний автоматичний фільтр

У рулонних автоматичних фільтрах (рис. 14) фільтрувальний матеріал 2 намотаний на котушки. По мірі забруднення він переміщується через отвір для проходу повітря з верхньої котушки 1 і намотується на нижню 3. Після забруднення всього рулону матеріал замінюється на новий.

Механізм осадження в цих фільтрах переважно інерційний. У деяких фільтрах при русі газу внаслідок їх електризації суттєвим є електростатичний ефект — т. зв. електростатичні фільтри. За принципом дії та конструкцією до сухих волокнистих фільтрів близькі губчасті з модифікованого пінополіуретану. За ефективністю уловлювання вони відповідають масляним.

Волокнисті фільтри — тумановловлювачі, крім загальних механізмів фільтрації затримують краплини за рахунок їх коалесценції з утворенням плівки рідини. Далі ця рідина безперервно видаляється у вигляді струминок, які рухаються всередині шару чи з його тильної сторони вна-

слідок гравітаційних, капілярних або гідродинамічних сил (режим самоочищення).

За основним механізмом осадження виділяють низькошвидкісні, тобто дифузійні з тонкими волокнами (поліпропілен, скловолокно), та високошвидкісні тумановловлювачі, тобто інерційні з грубими волокнами (поліпропіленові, лавсанові, повстяні) або сітками (рис. 15, б). Перші працюють зі швидкістю газу до 0,15 м/с, мають ефективність очищення до 99,99% і складаються з 5...100 елементів (див. рис. 15, а). Елемент складають дві співвісні циліндричні сітки 2, простір між якими заповнений волокном 3 (див. рис. 15, б). Сітки приварені до вхідного патрубку — фланця 1 та дна, яке обладнане трубкою, зануреною у стакан — гідрозатвор 5, до якого уловлена рідина потрапляє за допомогою дренажу 4 і згодом перетікає до корпусу апарата.

Високошвидкісні фільтри (рис. 16) мають менші габарити і вартість, але й нижчу ефективність. Їхні конструкції розрізняються за напрямком газового потоку, наявністю промивання чи переміщення фільтроелементу. Туман уловлюється за допомогою перфорованого барабана 1 з глухою кришкою, в якому встановлено грубоволокнисту повсть 2. Фільтроелемент затримує краплини, які стікають і накопичуються в нижній частині апарата, утворюючи шар рідини. Для запобігання унесенню краплин використовуються бризковловлювачі 3 і 4, що складаються з плоских та гофрованих шарів вініпластових стрічок. Застосовуються також двоступінчасті тумановловлювачі.

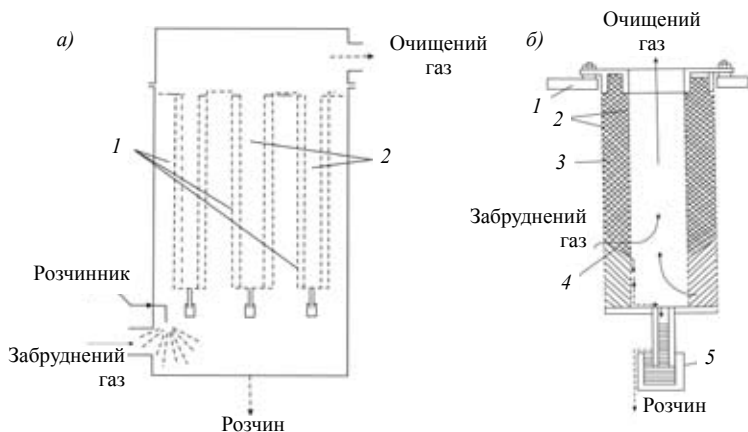


Рис. 15. Низькошвидкісний фільтр — тумановловлювач: а — схема роботи; б — фільтроелемент

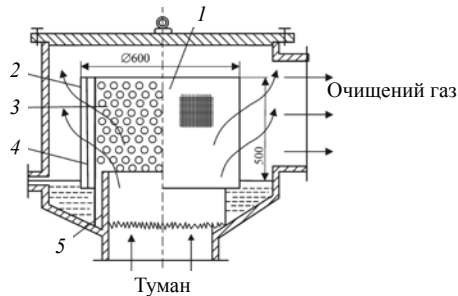


Рис. 16. Високошвидкісний фільтр — тумановловлювач

3.3. Сіткові фільтри

Фільтри такого типу набули широкого застосування для очищення припливного повітря у системах кондиціонування та вентиляції. Їх називають масляними, тому що для запобігання унесенню осаджених частинок з фільтра та корозії металевих сіток їхні перегородки промаслюються.

Найпоширенішою конструкцією таких фільтрів є касети з металевими або пластмасовими гофрованими сітками (інколи сітками зі скловолокна), що закріплені в металевій коробці. Більш ефективними є фільтри безперервної дії з автоматичною регенерацією чи заміною фільтруючої поверхні. У самоочищувальних масляних фільтрах (рис. 17, а) фільтрувальні нескінченні стрічки 2 безперервно рухаються у вертикальній площині, періодично занурюючись у масляний бак 5 з підігрівачем масла 4 та маслосійомником 3, де промиваються за допомогою спеціального механізму 1 та промаслюються, а шлам, що утворюється, видаляється шнеком 6. У сучасних конструкціях запилений газ послідовно проходить через декілька фільтрувальних стрічок, чим забезпечується вища ефективність очищення.

Для уловлювання рідких частинок розміром до 5 мкм використовують бризковловлювачі з пакетів в'язаних металевих сіток 3, що закріплюються на опорному кільці 1 та додаткових опорах 2. Такі фільтри призначені для уловлювання крапель, що уносяться з відхідними газами в процесах абсорбції, ректифікації, мокрого пиловловлювання тощо.

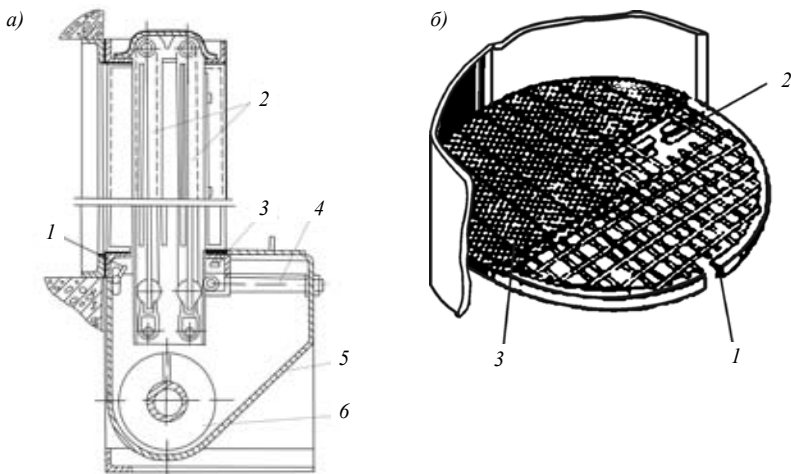


Рис. 17. Сіткові фільтри: *а* — масляний самоочищувальний; *б* — бризковловлювач

3.4. Зернисті фільтри

Різновидами зернистих фільтрів є зернисті насипні, де вловлюючі елементи жорстко не пов'язані один з одним і утворюють статичні, динамічні або псевдозріджені шари та жорсткі пористі, де зерна внаслідок спікання або склеювання утворюють міцну нерухому систему.

У насипних фільтрах як насадку використовують пісок, шлак, подрібнені гірські породи, кришку гуми, пластмаси та стандартні насадки.

Установки бувають безперервної та періодичної дії. Останні роблять багатосекційними з регенерацією частини секцій, наприклад вібрацією (рис. 18, *а*). Тут контейнер із сітчастим дном встановлений на чотирьох пружинах 4 і з'єднаний з вібратором 3. У контейнер засипано два шари фільтрувального матеріалу: нижній 2 зі сталеві стружки та верхній 1 з гравію, проходячи крізь які знизу забруднене повітря очищується. При регенерації вхід запиленого повітря перекривають і в зворотному напрямку пропускають продувне повітря, а контейнеру з фільтруючими шарами надають вібраційного руху. Пил потрапляє до бункера і видаляється з нього шнеком 5. Установки виготовляють багатосекційними, аналогічно рукавним фільтрам.

У фільтрах безперервної дії (див. рис. 18, *б*) зернистий матеріал 4 подається по вхідному коробу 1 живильниками 2 у простір між сітками або

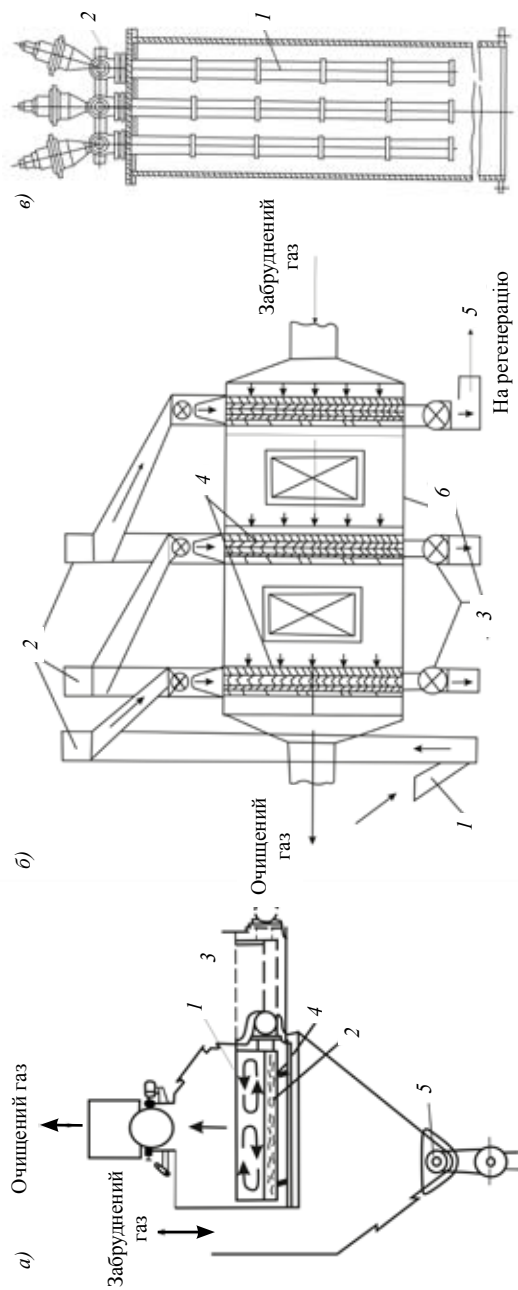


Рис. 18. Зернисті фільтри: *а* — з нерухомим зернистим шаром; *б* — із зручним шаром, що рухається; *в* — з жорсткими пористими перегородками

жалюзійними ґратами, опускається вниз під дією гравітаційних сил та видаляється через затвор 3 та вихідний короб 5 на регенерацію. Забруднений газ рухається перехресно до фільтрувальних шарів. Регенерація зернистого матеріалу проводиться шляхом промивання або грохочення, після чого він повертається в апарат.

Жорсткі фільтри мають пористі перегородки з кераміки, металів або пластмас у вигляді труб 2 (листів, дисків), що закріплюються у ґратах 3 (див. рис. 18, в). Принцип дії апаратів такий самий, як у рукавних фільтрах. Регенерація проводиться пропусканням повітря, гарячих газів, пари, рідини у зворотному відносно робочого потоку напрямку або простукуванням чи вібрацією ґрат.

Зернисті фільтри використовують для очищення високоагресивних газових потоків з високою температурою, а жорсткі крім того — при високому тиску та значних механічних навантаженнях.

4. СКРУБЕРИ

Скрубером називають апарат, в якому для відділення дисперсної або газоподібної домішки від газу використовується рідина. Скрубери знайшли широке застосування в процесах мокрого пиловловлювання, абсорбційного газоочищення, охолодження та ін.

При пиловловлюванні зрошувальною рідиною є вода. Інколи з метою підвищення ефективності процесу додають поверхнево-активні речовини, проте це не завжди позитивно впливає на процес уловлювання. У процесах абсорбції вода використовується для зрошування в тому випадку, коли речовина, що уловлюється (HCl , HF , SiF_4 , деякі органічні з'єднання), добре розчиняється у воді. Іноді використовують підкислену воду, а також лужні розчини NaOH (для абсорбції SO_2 , Cl_2 , H_2S). Крім того, залежно від властивостей домішок можуть бути застосовані органічні з'єднання: метанол, аміни, масла, водний розчин вапна, солі магнію, літію, натрію, аміачна вода, карбонати, рідкий азот та ін. Вибір абсорбенту залежить від властивостей домішок, передусім від його розчинності у тій чи іншій рідині, або реакційної властивості по відношенню до неї. Так, для уловлювання CO_2 застосовуються вода, водні розчини вапна,

лужні стічні води ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH), магнезит, суспензія оксиду цинку, сульфат натрію та інші його солі, аміачна вода, розплави солей літію, натрію. Від сірководню газу очищуються за допомогою карбонатів Na і K , аміачного розчину As_2O_3 , зависі гідроксидів заліза, етаноламінів; від сірковуглецю і меркаптанів — лужними розчинами; від оксидів азоту — водою, розчинами луг та солей; від галогенів та їх з'єднань — водою, вапнистим молоком, розчинами луг та органічних речовин.

Оскільки інтенсивність уловлювання залежить від величини поверхні контакту фаз, площу скрубєрів при розробці намагаються підвищити різними засобами, залежно від яких апарати можна поділити на три групи:

- поверхневі скрубєри, де поверхнею контакту є дзеркало рідини або поверхня плівки рідини, що стікає, наприклад по насадці;
- барботажні, де поверхня контакту утворюється потоками газу, що розподіляються в рідині у вигляді бульбашок або струминок унаслідок проходження його крізь заповнений рідиною апарат, спеціальні тарілки чи рухливу зрошувальну насадку;
- розпилювальні, де контакт здійснюється при розпиленні рідини в масі газу на дрібні краплини форсунками, механічними засобами або течією газу, що рухається з високою швидкістю.

4.1. Поверхневі скрубєри

Найпростішою конструкцією таких апаратів є поверхневий абсорбер, де газ проходить над поверхнею нерухомої або повільно текучої рідини, наприклад, у системі каналів. Ці апарати є малоефективними й використовуються переважно для абсорбції компонентів, що добре розчиняються у невеликих об'ємах поглинача. Сказане стосується й плівкових скрубєрів, де газ і рідина стикаються на поверхні рідкої плівки, яка тече по вертикальних трубах або пластинах прямо або протитечією.

Натомість широке застосування знайшли насадкові скрубєри-колони, що завантажені насадкою різної форми (рис. 19), яка зрошується зверху рідиною і на змоченій поверхні якої відбувається масообмін з газом, що рухається знизу. Можливим способом укладання насадки на грати є навал або регулярний, коли нижні ряди складаються з насадки більшого розміру, ніж верхні. Цим забезпечується рівномірний розподіл рідини по насадці. Із цією ж метою насадку розбивають на секції, між якими встановлюють перерозподільні пристрої для рідини.

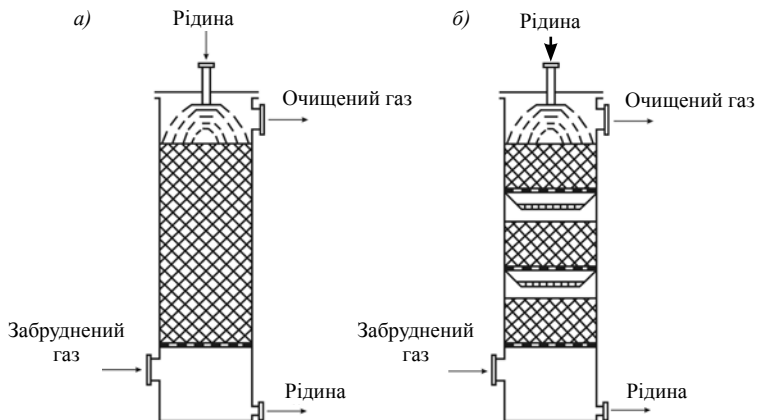


Рис. 19. Насадкові скрубери: *а* — із суцільним завантаженням; *б* — із секційним завантаженням насадки

До найпоширеніших видів насадок належать кільцеві, елементами яких є тонкостінні циліндричні кільця, висота яких, зазвичай, дорівнює зовнішньому діаметру. Кільця малого діаметра (до 50 мм) завантажують у абсорбер навалом, а великого — правильними рядами у шаховому порядку. Найпростішим різновидом кільцевої насадки є кільця Рашига — прості циліндри без додаткових пристроїв (рис. 20, *а*), виготовлені з кераміки або фарфору, рідше з металів, вуглеграфітових і пластичних мас. З метою збільшення поверхні насадки розроблені кільця Лесіга з однією або двома хрестоподібними перегородками (див. рис. 20, *б, в*); спіральні кільця з розташованими всередині однією або декількома спіралями (див. рис. 20, *г, д*); кільця Палля з перфорованими стінками (див. рис. 20, *е*) тощо.

Керамічна сидлоподібна насадка використовується для неупорядкованого завантаження. У промисловості набули поширення сидла Берля (див. рис. 20, *є*) з поверхнею у вигляді гіперболічного параболоїда та сидла Інталокс (див. рис. 20, *ж*), поверхня яких має вигляд частини тора. На поверхні сидел Інталокс є невеликі виступи, що виключає можливість щільного прилягання елементів насадки один до одного. У порівнянні з кільцями Рашига такі насадки мають більшу питому поверхню і дещо більший вільний об'єм, кращу змочуваність і менший гідравлічний опір.

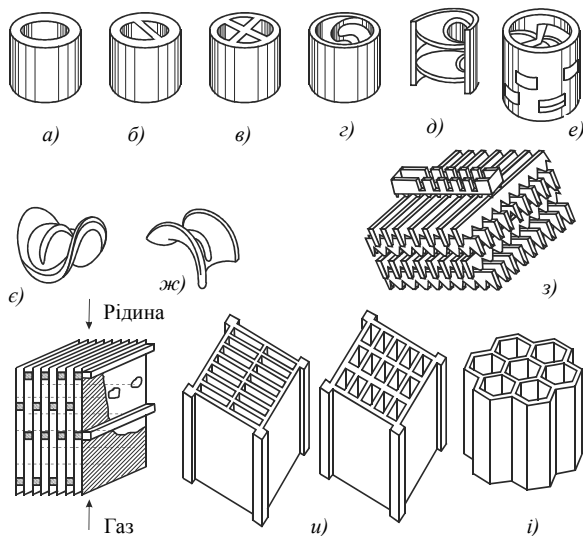


Рис. 20. Типи насадок

В абсорберах великого діаметра використовується дерев'яна хордова насадка (див. рис. 20, з), яка складається із ґраток. Ґратки формуються з поставлених на ребро дошок, розташованих по хордах кола поперечного перерізу абсорбера. У суміжних ґратках дошки розташовані під прямим кутом одна до одної. Незважаючи на малу масу, дешевизну та простоту виготовлення, використання хордових насадок обмежено внаслідок їхньої невеликої питомої поверхні і малого вільного об'єму.

Плоскопаралельна насадка (див. рис. 20, и) складається з вертикальних пакетів плоских або гофрованих пластин, виготовлених з металу або (при роботі за невисоких температур) склотканини. Основне уловлювання домішок відбувається у плівці рідини, що стікає по стінках пластин.

Елементами регулярної блокової насадки (див. рис. 20, і) є керамічні порожнинні великогабаритні блоки прямокутного або стільникового перерізу. Основною перевагою блокової насадки є спрощення робіт з укладання в апараті і малий гідравлічний опір. Її ефективність не нижча, ніж в інших видах регулярних насадок.

Існують і інші типи насадок: кускові (з кусків коксу, кварцу), дротяні спіральні, розетки, металеві сіткові, пропелерні тощо. Проте ці насадки не набули широкого промислового застосування.

Залежно від щільності зрошення і швидкості газу насадкові скрубери можуть працювати у плівковому режимі масообміну на поверхні насадки; режимі підвисання, коли рідина гальмується газовим потоком та змочувальна поверхня зростає; емульгування, коли внаслідок накопичення у вільному об'ємі насадки настає інверсія фаз — рідина (дисперсійна фаза) і газ (дисперсна) утворюють емульсію (пінну). Найбільш ефективний режим у кожному випадку визначається техніко-економічним аналізом.

4.2. Барботажні скрубери

У техніці газоочищення та пиловловлювання зі скрубєрів цього типу найбільше застосування знайшли абсорбери тарілчастого типу та апарати з рухливою насадкою. Тарілчасті скрубери мають горизонтальні перегородки — переливні або провальні тарілки, які розміщені на певній відстані одна від одної і забезпечують спрямований рух рідини і газу та їх багаторазову взаємодію.

У тарілках першого типу газ і рідина рухаються перехресним струменем (рис. 21, *а*) або в одному напрямку (див. рис. 21, *б*). Переливання рідини з тарілки на тарілку здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв, наприклад трубок, так що рідина на сусідніх тарілках рухається у протилежних напрямках. Газ поступає знизу і послідовно проходить крізь отвори кожної тарілки, перемішуючись із шаром рідини на ній. При контакті газу з рідиною відбувається масообмін — видалення

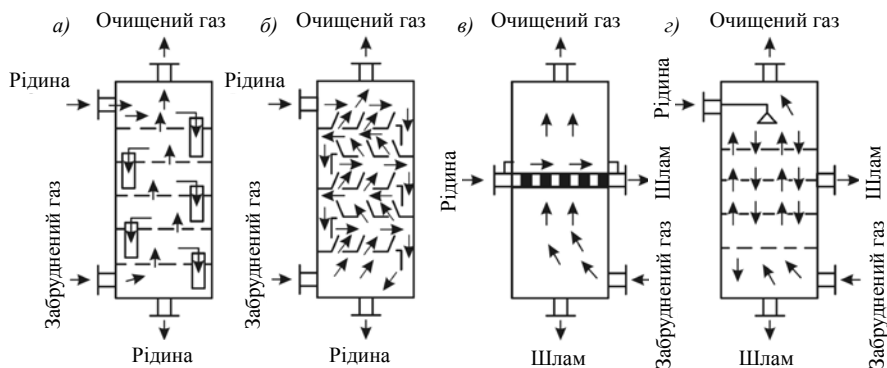


Рис. 21. Типи тарілчастих скрубєрів: *а* — з тарілками з перехресною течією; *б* — з рухом газу і рідини в одному напрямку; *в* — пінний; *з* — з провальними тарілками

з газу шкідливої речовини. Очищений газ виводиться з верхньої частини апарата.

У пиловловлюванні можуть застосовуватися також пінні апарати (див. рис. 21, *в*), що є різновидом апаратів з перехресним рухом. У провальних тарілках газ і рідина поперемінно проходять крізь одні й ті ж отвори (див. рис. 21, *г*). Існують і тарілки й інших типів. Конструкції деяких тарілок зображено на рис. 22.

Тарілки з переливними засобами з підвищенням швидкості газу поспідовно працюють у бульбашковому, пінному та інжекційному режимах. Найкращим з точки зору ефективності масообміну є пінний режим, при якому контакт між газом і рідиною відбувається на поверхні бульбашок газу і крапель рідини.

Провальні тарілки ефективно працюють в інтервалі швидкостей газу, при яких він барботує крізь шар рідини, що накопичується на тарілці (газ і рідина поперемінно проходять крізь ті ж самі отвори).

У скруберах з рухливою насадкою масообмін відбувається на поверхні легких насадкових тіл, наприклад пластмасових куль. При подачі під опорні ґратки 1 у нижній частині апарата газу з певною швидкістю (рис. 23) насадка 2 підіймається з ґрат, утворюючи псевдозріджений шар. Рідина, в свою чергу, зрошує насадку зверху за допомогою розпилювача 4. Хаотичні переміщення насадки сприяють турбулізації шару, а, відтак, і інтенсифікації масообміну, а також очищенню її елементів. Для запобігання внесенню насадкових тіл служать обмежувальні ґрати 3, а унесенню краплин рідини — бризкоуловлювач 5. Застосування

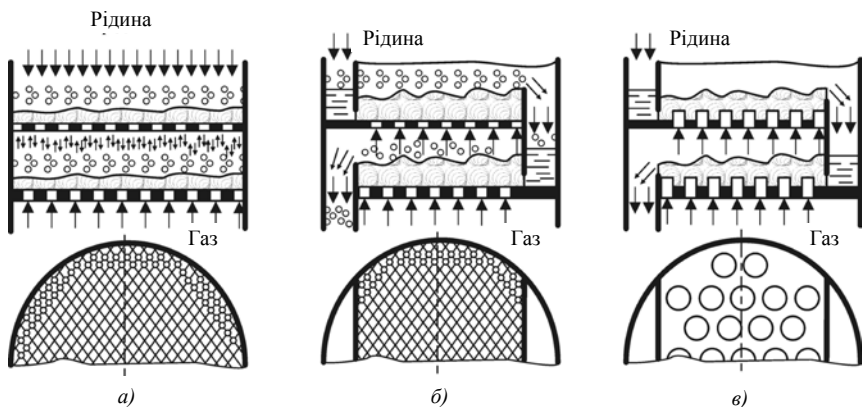


Рис. 22. Конструкції тарілок: *а* — провальні; *б* — сітчасті переточні; *в* — клапанні

зазначених апаратів особливо ефективно для очищення запилених газів, тому що внаслідок інтенсивного руху насадки вона не забивається твердими частинками.

4.3. Розпилювальні скрубери

Апарати цього типу поділяються залежно від способу розпилення рідини на порожнинні (форсункові), швидкісні та механічні. У порожнинних скруберах розпилювання проходить за рахунок енергії рідини, що диспергується за допомогою форсунок, сопел тощо у вертикальних і горизонтальних камерах, де відбувається її контакт із забрудненим газом (рис. 24, *а*). Для поліпшення рівномірності розподілу газу і використання ефекту плівкового поглинання застосовують скрубери циклонного типу (див. рис. 24, *б*). Запилений газ тангенціально подається у нижню частину апарата і рухається вгору по гвинтовій лінії. Поглинач розбризкується через трубки, розташовані по внутрішньому периметру апарата. Уловлювання забруд-

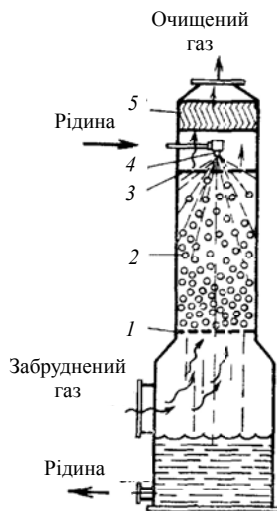


Рис. 23. Скрубер з рухливою насадкою

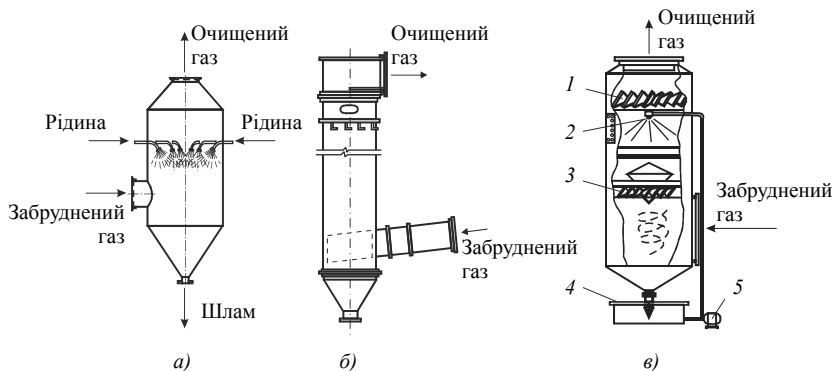


Рис. 24. Порожнинні скрубери: *а* — форсунковий; *б* — циклон з водяною плівкою; *в* — з внутрішнім завихрювачем: 1 — розкручувач; 2 — зрошувальний пристрій; 3 — завихрювач; 4 — збирач рідини; 5 — насос

нень відбувається як плівкою рідини на стінках корпусу, так і краплинами поглинача в об'ємі скрубера. В інших конструкціях закручування газового потоку здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв, а рідина розбризкується форсунками, встановленими у центральній частині апарата (див. рис. 24, в).

Біля стінок скрубера формується обертовий висхідний потік, а в центральній частині апарата — низхідний потік, які зливаються поблизу вхідного патрубка. Частинки можуть занурюватися та змиватися плівкою води, що стікає, або пробивати плівку, відскакувати від стінки і повертатися до повітряного потоку.

У швидкісних розпилюючих скруберах рідина диспергується за рахунок кінетичної енергії газового потоку, що рухається з великою швидкістю (40...150 м/с). У цих апаратах розпилення відбувається або при струменевому чи плівковому режимі течії рідини (як правило, у трубі Вентурі) (рис. 25, а), або при ударі газу, що рухається з великою швидкістю, об поверхню рідини (див. рис. 25, б). У трубі Вентурі газ, потрапляючи в конфузор 1, унаслідок поступового зменшення поперечно-го перетину поступово набуває великої швидкості, яка може досягати у горловині 2 значення 150 м/с. При подачі до такого потоку рідини остання буде розпилюватися на краплини невеличкого розміру, а також буде інтенсивно турбулізуватися. Таким чином, швидкість поглинання домішок зростатиме як за рахунок збільшення поверхні масообміну, так і за рахунок зростання швидкості турбулентної дифузії. У подальшому потік газу і рідини проходить через дифузор 3, де його швидкість (у зв'язку з розширенням труби) зменшується, до сепаратора 4, наприклад, циклонного типу. Тут швидкість потоку різко падає, краплини рі-

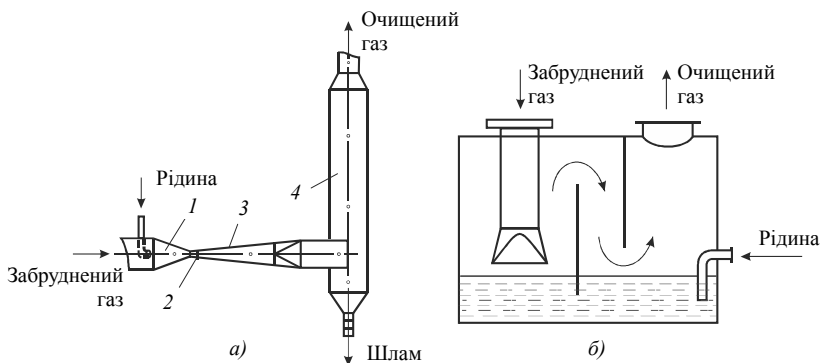


Рис. 25. Швидкісні скрубери: а — скрубера Вентурі; б — скрубера Дойля

дини разом з поглинутими забрудненнями відділяються від газу та видаляються з нижньої частини апарата. Рідина до труби Вентурі може подаватися у вигляді плівки, що переливається через край конфузора, у вигляді струминок рідини, які подаються через установлені по периферії горловини форсунки, сопла або отвори, або у вигляді струменя, що подається через форсунки, розміщені біля горловини, або перед нею (рис. 25, *а*). У скрубєрі Дойля (див. рис. 25, *б*) газ поступає через трубу, в нижній частині якої встановлені конічні сопла для прискорення газового потоку. В результаті забруднений газ із досить високою швидкістю (35...55 м/с) вдаряється об поверхню рідини, що подається у нижню частину апарата, утворюючи піну з розвинутою поверхнею масообміну. Далі очищений газ оминає перегородки, що служать для сепарації краплин рідини за рахунок інерційних сил, та виходить через патрубок у верхній частині апарата, а вода видаляється за допомогою зливного пристрою 4.

У механічних скрубєрах рідина розпилюється за рахунок підведення механічної енергії за допомогою дисків, занурених конусів, перфорованих циліндрів, лопатей, що насаджені на горизонтальні або вертикальні вали (рис. 26). Так, у механічному абсорбері з горизонтальним валом (див. рис. 26, *б*) на останньому закріплені диски, які частково занурені у рідину-поглинач і при обертанні захоплюють та розбризкують її.

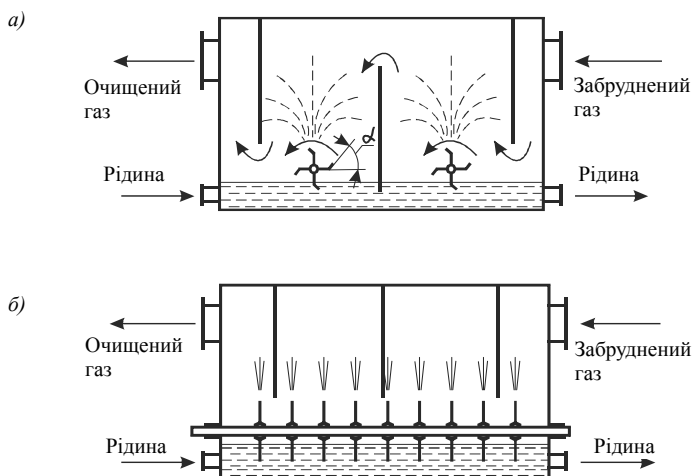


Рис. 26. Механічні скрубєри: *а* — з лопатевими валками; *б* — з розбризкувальними дисками

Газ рухається паралельно осі, очищуючись при контакті з краплинами поглинача і відділяючись від останніх при зміні напрямку руху навколо перегородок.

До апаратів цього типу належать також роторні відцентрові скрубери. У них рідина-поглинач подається у центр ротора — горизонтального диска з концентричними лопатями, насадженого на вал, що рухається. Статор також має лопаті, розміщені між лопатями ротора. При обертанні вала рідина переливається через кромку центральної лопаті ротора, розпилюється, потрапляє на нерухому лопать, стікає з неї, розпилюється наступною лопаттю ротора і т. д. З останньої лопаті статора рідина потрапляє на стінку апарата та зтікає з неї вниз. Газ також подається у центральну частину ротора і рухається до периферії, проходячи через ряд аерозольних систем між нерухомими та рухомими лопатями, очищуючись від забруднень.

Для уловлювання пилу найефективнішим є використання скруберів Вентурі. Широке застосування знайшли пінні, порожнинні, ударно-інерційні апарати, а також пиловловлювачі з рухливою насадкою. Насадкові й тарілчасті пиловловлювачі мають обмежене застосування у зв'язку з високою ймовірністю забивання вузьких каналів, якими рухаються рідина та газ. Високий ступінь очищення повітря від газоподібних домішок досягається у різних типах насадкових, тарілчастих і швидкісних абсорберів.

5. АДСОРБЕРИ

Адсорбери — це апарати, в яких видалення з газового середовища газо- та пароподібних домішок відбувається внаслідок поглинання поверхневим шаром твердих речовин-адсорбентів.

Адсорбери поділяються на апарати періодичної дії (з нерухомим шаром адсорбенту) та безперервної дії — з шаром адсорбенту, що рухається або знаходиться у псевдозрідженому стані. Як адсорбенти переважно використовуються активоване вугілля, силікагелі ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), цеоліти ($\text{Me}_2/n\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$) та іоніти. Вибір типу адсорбенту зумовлений його здатністю до поглинання конкретного забруднення, а також особливостями проходження процесу.

У техніці газоочищення найбільш поширеними є адсорбери з нерухомим шаром адсорбенту. При невеликих витратах парогазової суміші здебільшого використовують вертикальні (рис. 27, а) а при великих — горизонтальні або кільцеві конструкції. Адсорбент розміщують на ґратах, а подачу газу здійснюють згори вниз. Після повного насичення адсорбенту подачу парогазової суміші припиняють, а у зворотному напрямку крізь шар поглинача пропускають десорбуючий агент. Якщо останнім є водяна пара, то після закінчення десорбції шар адсорбенту спочатку сушать, а потім охолоджують, пропускаючи крізь нього зверху вниз відповідно гаряче та холодне повітря. Сконденсована пара видаляється з нижньої частини апарата. Рекупераційні установки, як правило, включають у себе декілька таких апаратів, в кожному з яких послідовно проходять фази адсорбції, десорбції (регенерації поглинача витісненням або випарюванням), сушіння (нагрітим повітрям) і охолодження (атмосферним повітрям). Існують установки, що працюють за трифазним (без сушіння або охолодження) або двофазним (адсорбція і десорбція) циклами. У будь-якому випадку частина адсорбентів постійно працює у режимі поглинання, так що установка діє безперервно.

Адсорбери безперервної дії можуть мати вигляд колони або фільтра з гранульованим шаром адсорбенту, що рухається, наприклад, за допомогою транспортера вздовж апарата (див. рис. 27, б). Забруднений газ подається у нижню частину адсорбера та проходить через розподіль-

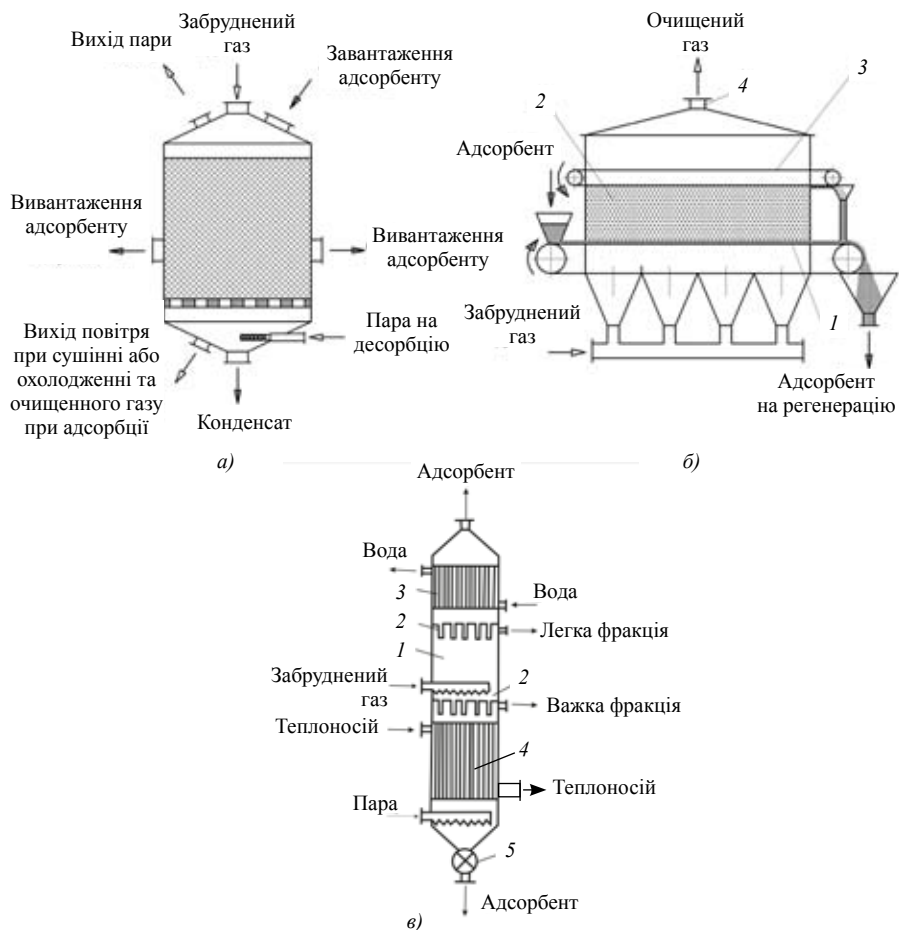


Рис. 27. Конструкції адсорберів: *а* — періодичної дії; *б, в* — із шаром адсорбенту, що рухається

чі грати 1 та шар адсорбенту 2 і виводиться через вихідний штуцер 4. Для зниження винесення пилу з відхідними газами служить стрічковий фільтр 3. Іншим типом таких апаратів є колона (див. рис. 27, в), у верхню частину якої подається адсорбент. Опускаючись, він проходить стадії охолодження у теплообміннику 3, контактує із забрудненим газом у зоні адсорбції 3 та піддається регенерації водяною парою після підігріву у теплообміннику 4. Далі поглинач через затвір 5 подається на окремо розташований осушувач та повертається в адсорбер. Очищений

газ та домішки видаляються через розташовані на різних рівнях розподільні тарілки 2.

Апарати з псевдозрідженим шаром частинок адсорбенту бувають багатокамерними і, рідше, однокамерними. Багатокамерний адсорбер (рис. 28) розділений на секції тарілками 5. Адсорбент подається через патрубок 3 у верхній частині апарата, а забруднений газ — через штуцер 1 у нижній частині. Швидкість подачі газу повинна бути такою, щоб забезпечувати утворення у секціях псевдозрідженого шару адсорбенту 6 та інтенсивний масообмін. Поглинач поступово переходить через переточні трубки 2 на нижчерозташовані тарілки та через патрубок 7 видаляється з апарата, а вилучення очищеного газу здійснюється за допомогою штуцера 4.

Форма адсорберів може бути циліндричною, конічною, конічно-циліндричною та призматичною. Конічні апарати з малими кутами розкриття конусу дають змогу отримати найкращі гідродинамічні характеристики (симетричний профіль швидкостей газу в різних поперечних перерізах апарата), а також рівномірне псевдозрідження при використанні адсорбентів, неоднорідних за своїм гранулометричним складом. Циліндрична форма апарата за гідродинамічними показниками поступається конічній, але внаслідок конструктивних переваг циліндричні апарати знаходять широке застосування у промисловості. Ще гірші гідравлічні характеристики мають апарати прямокутного перерізу. Найбільш широке використання у промисловості знаходять конічно-циліндричні апарати.

Усі установки безперервної дії повинні мати спеціальні десорбери, осушувачі та охолоджувачі або відповідні відділення в адсорбері.

Так, адсорбційна установка (рис. 29) включає в себе однокамерний адсорбер 1 та десорбер 2, що мають циліндричні корпуси з конічними днищами й розширеним сепараційним простором 3 у верхній частині.

Газ, що поступає на очищення, змішується з регенованим поглиначем і поступає в нижню частину адсорбера 1 зі швидкістю, що

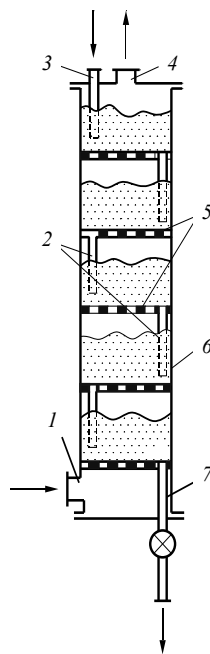


Рис. 28. Багатокамерний адсорбер з псевдозрідженим шаром

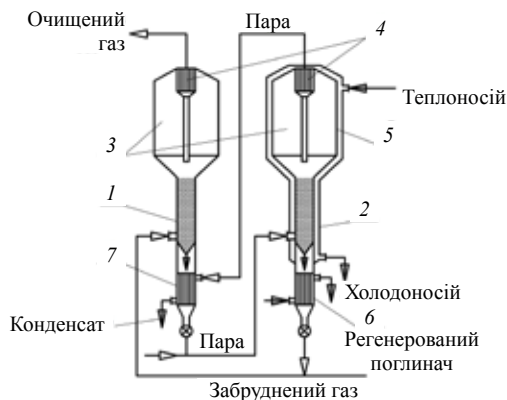


Рис. 29. Установка для адсорбції і десорбції у псевдо зрідженому шарі адсорбенту

відповідає режиму утворення псевдозрідженого шару. Після очищення газ через циклон 4 виводиться з апарата. Відпрацьований поглинач підігрівається у теплообміннику 7, видаляється з нижньої частини адсорбера, захоплюється десорбуючим агентом (водяною парою) і по трубі подається до десорбера 2 зі швидкістю, необхідною для підтримання адсорбенту в псевдорозрідженому стані. Десорбер підігрівається теплоносієм через оболонку 5, під дією високої температури сорбент регенерується та після охолодження у холодильнику 6 повертається у цикл. Суміш парів води та десорбованих речовин через циклон 4 поступає в теплообмінник 7, де використовується як теплоносій і далі виводиться у конденсатор. Протиструминні колони мають обмежене застосування. Агрегати типу, зображеного на рис. 26, б, ефективні при очищенні газів з високою концентрацією забруднюючих речовин.

Адсорбція у псевдозрідженому шарі ефективна у багатостадійних процесах. Для підвищення ефективності адсорбційних апаратів розроблено комбіновані конструкції, де частина адсорбенту рухається, а частина знаходиться у псевдозрідженому стані, а також установки з віброкиплячим шаром, механічним перемішуванням, імпульсним подаванням адсорбенту та ін.

Адсорбційні методи дозволяють з високою ефективністю очищувати гази з порівняно невисокою концентрацією забруднюючих речовин.

6. ІОНООБМІННІ АПАРАТИ

Газоочищення в цих апаратах проводиться шляхом проходження забруднюючого газу через шар іонітів — високомолекулярних сполук, що мають просторову сітку з вуглеводневих радикалів з фіксованими на ній катіоно- або аніонообмінними функціональними групами. При цьому відбувається комплекс сорбційних процесів. Іоніти періодично треба регенерувати промиванням водою або розчинами дешевих реагентів.

Найпоширенішими апаратами є іонітові фільтри, де полотно з іонообмінних волокон закріплено на вертикальних рамках, розділених порожніми каналами і розміщених у прямокутному корпусі, або (в установках безперервної дії) в секціях циліндричного ротора, що обертається навколо своєї осі. При цьому частина полотен працює у режимі поглинання, а інша — регенерації.

З метою підвищення ефективності очищення повітря й газів розроблено комбіновані іонообмінно-контакторні фільтри (рис. 30). У них відхідні гази спочатку шляхом дифузії потрапляють до іонообмінної поверхні пластин блока контактора 1, потім повітря проходить через іонообмінний фільтр 2. У результаті шкідливі домішки хімічно зв'язуються функціональними групами іонітів. Регенерація здійснюється шляхом зрошення водою або розчином реагенту пристроями, розта-

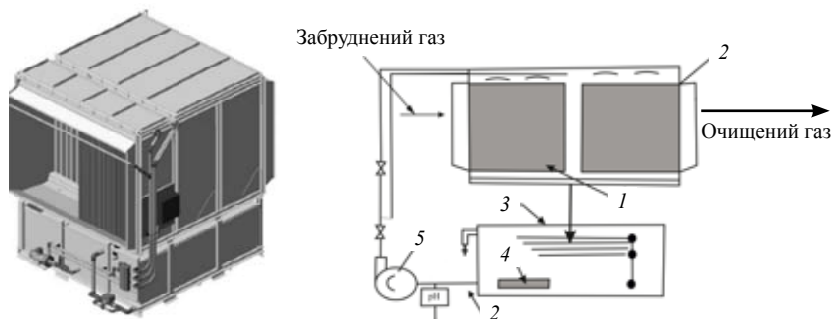


Рис. 30. Іонообмінний фільтр РІФ-ФК

шованими у верхній частині апарата та збирається у баці регенерату 3. Звідти через фільтр очищення від грубих механічних домішок 4 рідина циркуляційним насосом 5 повертається на зрошення.

Розроблено також апарати для поглинання домішок у псевдозрідженому шарі гранульованого іоніту з періодичною регенерацією лужними розчинами (рис. 31).

Іонообмінні апарати здатні очищувати повітря від аерозолів, газів і парів з ефективністю до 98 %.

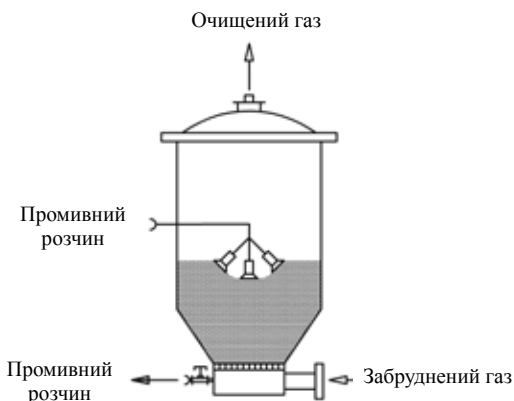


Рис. 31. Іонообмінний апарат з псевдозрідженим шаром іоніту

7. КАТАЛІТИЧНІ РЕАКТОРИ

Реактори, що використовуються у промисловості для очищення газів шляхом гетерогенного каталізу, є контактними апаратами поверхневого типу, з фільтруючим або псевдозрідженим шаром каталізатора або ж пилоподібним каталізатором, що рухається.

Каталізатори для газоочищення виготовляють на основі міді, хрому, кобальту, марганцю, нікелю, платини, паладію та інших металів, що можуть бути нанесені на сітки або листи з нержавіючої сталі чи оксиду алюмінію, на керамічні стільники або ґрати, на гранули оксиду алюмінію або використовуватися безпосередньо у пилоподібному чи гранулоподібному вигляді.

Апарати поверхневого контакту з каталізатором у вигляді труб, стільників або сіток (рис. 32, *а*) мають невелику активну поверхню, тому застосовуються тільки для проведення швидких екзотермічних реакцій. Найбільш поширені реактори з фільтрувальним шаром каталізатора 1, що укладається на опорних ґратах 2 або у трубах і через які зверху або знизу пропускається забруднений газ (див. рис. 32, *б*). Особливості конструкцій цих апаратів зумовлені переважно типом теплообмінників 3, необхідних для підтримання оптимального температурного режиму. Так, використовуються внутрішні полицеві (ступеневий теплообмін у просторі між полицями) або трубчасті (безперервний теплообмін), а також зовнішні та комбіновані теплообмінники. В апаратах зі псевдозрідженим шаром каталізатора (див. рис. 32, *в*) ґрати 3 разом з конусом 4 призначені для рівномірного розподілу газового потоку по перерізу. Це, а також розміщення теплообмінника 3 безпосередньо у киплячому шарі 2 забезпечує інтенсивний тепло- й масообмін. До переваг апаратів з псевдозрідженим шаром каталізатора належить також безперервність процесу газоочищення.

Установки з пілоподібним шаром каталізатора забезпечують інтенсивне проходження реакції при русі потоку зависі каталізатора у забрудненому газі. Проте істотним недоліком цих апаратів є увнесення частинок каталізатора, які треба уловлювати за допомогою циклона або електрофільтра і повертати у реактор.

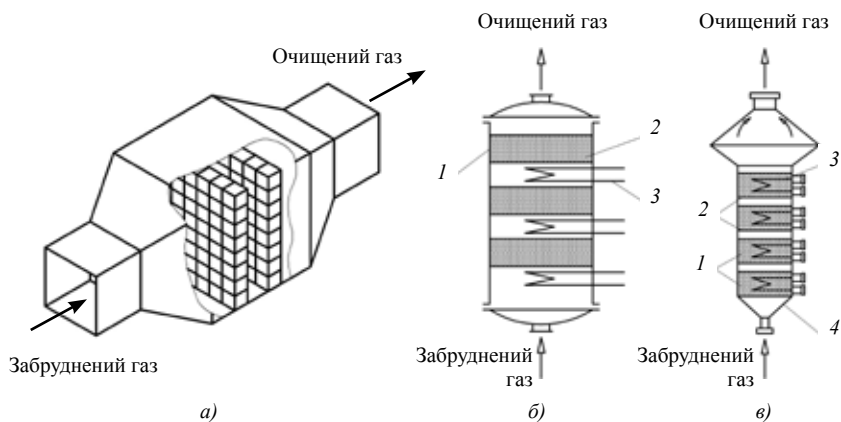


Рис. 32. Апарати каталітичного очищення газів: *а* — поверхневі; *б* — з фільтрувальним шаром каталізатора; *в* — з псевдозрідженим шаром каталізатора

8. АПАРАТИ ТЕРМІЧНОГО ЗНЕШКОДЖЕННЯ

8.1. Топкові пристрої

Топкові пристрої призначені для спалювання органічних домішок, що містяться у відхідних газах, тобто термічного окиснення вуглеводневих компонентів до CO_2 і H_2 та зміни хімічної форми деяких інших шкідливих речовин.

Такі апарати використовуються для термічного знешкодження газових викидів. Промислове застосування знайшли камерні, циклонні печі зі струминним змішуванням газів, технологічні топки, регенеративні установки, а також комбіновані пристрої. Схеми камерних та циклонних печей зображено на рис. 33, *а, б*. Камерна піч включає в себе камеру горіння 2 та камеру змішування 3, поєднану з газоходом 5. Забруднені гази потрапляють у камеру змішування, куди з топки надходять також продукти згоряння. При змішуванні цих потоків шкідливі компоненти окиснюються і через газохід та димову трубу видаляються в атмосферу.

У циклонну піч забруднений газ поступає через чотири діаметрально розташованих патрубки. Процес згоряння проходить у камері, де встановлено пальники 1. Через отвори 5 може подаватися повітря. Остаточне спалення шкідливих домішок відбувається на поверхні насадок 2 (шару битої цегли). Для регулювання тривалості проходження газу крізь шар через сопла 4 вдувають потік повітря. Знешкоджений газ виходить з димової труби 3.

У регенеративних установках (рис. 34, *а*) корпус 6 розділяється перегородками 7 на дві або декілька камер 5. Забруднений газ спочатку підігрівається, проходячи крізь шари регенеративної насадки 4, а потім знешкоджується у камері згоряння 8, в якій встановлено пальники 9, і здійснює реверсивний рух через вікна 10 до іншої камери, де віддає тепло регенеративній насадці. Таким чином, в одній частині камер насадка працює у режимі нагріву, а в іншій — у режимі охолодження. Вхід забрудненого газу та вихід очищеного газу здійснюються через патрубки 2 і 3, обладнані клапанами 1. Використання струминного принципу

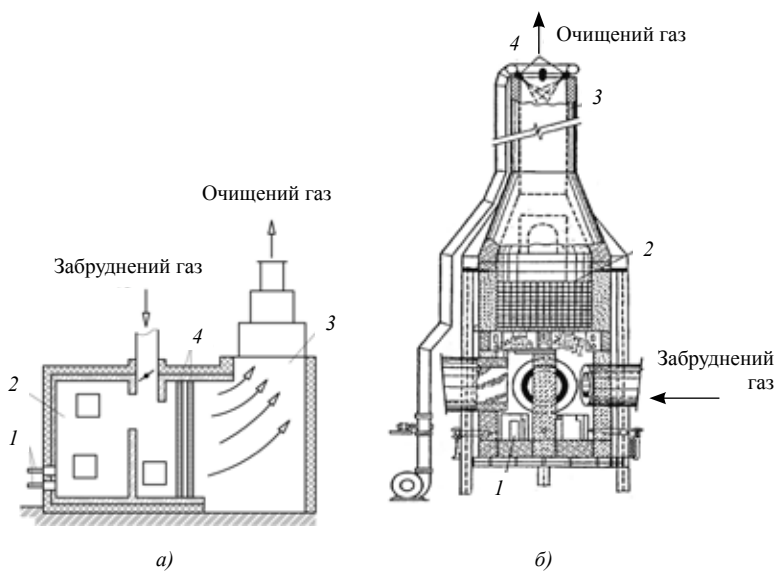


Рис. 33. Печі для спалювання газоподібних відходів: *а* — камерна; *б* — циклонна

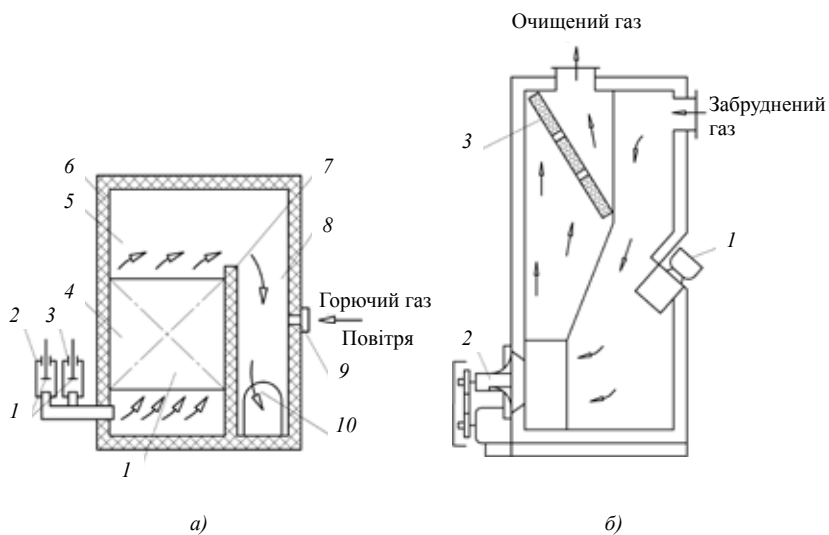


Рис. 34. Установки термічного знешкодження газових викидів: *а* — з регенеративним теплообмінником; *б* — із шаром каталізатора

утворення суміші компонентів згоряння забезпечує високоефективне знешкодження домішок. У деяких конструкціях передбачено розміщення установки рекуперативного теплообмінника з метою утилізації теплоти відхідних газів.

З метою підвищення ефективності знешкодження газових викидів застосовують термokatалітичні установки й апарати (див. рис. 34, б). У таких пристроях відхідні гази спочатку підігріваються до температури реакції за допомогою пальника 1, а потім вентилятором 2 спрямовуються на шар каталізатора 3, де й відбувається процес окиснення.

Використання технологічних топків, наприклад котлів ТЕЦ, може бути ефективним для знешкодження агломераційних газів. Топкові пристрої застосовують для знешкодження газів від домішок, які токсичні та легко окиснюються або погано пахнуть, за умови, що відхідні гази не містять великої кількості речовин, що конденсуються, не утворюють вибухонебезпечних сумішей з повітрям і більш токсичних з'єднань при згорянні.

8.2. Факельні установки

Коли забруднюючі речовини (попутні гази, ацетилен, метан) неможливо знешкодити у печах, їх спалюють на висотних або наземних факельних установках.

До складу таких установок входять пальники, сепаратор для збирання конденсату, факельні труби й регулююча арматура. Компонування елементів залежить від тиску газової суміші, вмісту вологи та ряду інших факторів. Кисень може подаватися як у зону горіння, так і перед нею. Існують і комбіновані схеми.

9. КОНДЕНСАТОРИ

Конденсаторами називаються теплообмінники, що призначені для переведення речовини з пароподібного стану в рідкий шляхом її охолодження.

Конденсацію проводять у поверхневих або контактних теплообмінниках. У контактних теплообмінниках газ безпосередньо стикається з холодоносієм. Найчастіше процес відбувається у скруберах, аналогічних описаним у розд. 4. Холодоагент повинен погано змішуватися з речовиною, що конденсується, і мати низький тиск пари (для запобігання зворотному масообміну). Важливим є питання недопущення утворення льоду в об'ємі конденсатора.

Поверхневі конденсатори використовують у тому випадку, коли пара, що конденсується, є основним компонентом газового потоку. Найчастіше використовують трубчасті теплообмінники з подачею холодоагенту всередину трубок, які часто мають гофровану зовнішню поверхню. Можлива також конденсація парів у трубках 3 (рис. 35), що закріплені у трубних гратах 2, розташованих у корпусі 1. Парогазова суміш поступає у верхню частину конденсатора, розподіляється по трубках, і, поступово охолоджуючись холодоагентом, що рухається протитечією у міжтрубному просторі, опускається вниз. Конденсат, який утворюється при цьому, відділяється від газу за допомогою конусної насадки 5.

Для підвищення швидкості та збільшення шляху холодоагенту у міжтрубному просторі служать перегородки 4.

Крім вертикальних апаратів застосовуються також горизонтальні, часто з нахилом для забез-

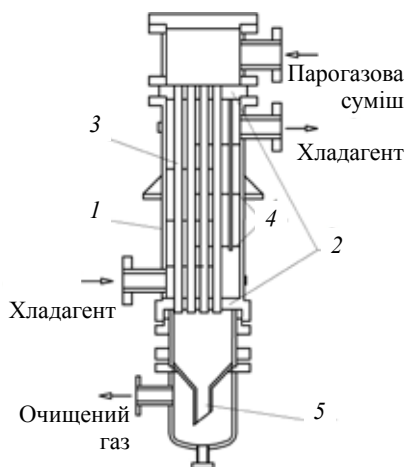


Рис. 35. Трубчастий конденсатор

печення стікання рідини. Інколи використовуються також теплообмінники з повітряним охолодженням. Конденсацію доцільно застосовувати для осадження речовин, що мають достатньо високі температури кипіння і порівняно високу концентрацію (вуглеводневі з'єднання). Для видалення летких розчинів застосовується двостадійна конденсація з низькотемпературним охолодженням на другій стадії.

10. БІОФІЛЬТРИ

У біофільтрах очищення повітря здійснюється за рахунок аеробного або анаеробного розкладання та асиміляції шкідливих домішок мікроорганізмами.

Біофільтри можна поділити на земляні, із шаром зволоженого ґрунту, крізь який через перфоровані трубки пропускається забруднений газ, і фільтри з інертною насадкою, на поверхні якої вирощується біоплівка. Апарати першого типу використовуються для видалення речовин, що погано пахнуть (аміак, метилмеркаптан) на м'ясокомбінатах, тютюнових і ферментних фабриках, для очищення відхідних газів каналізаційних камер. Як правило, застосовуються багат шарові фільтри. Зокрема, в апараті, зображеному на рис. 36, газ, що випускається через перфоровані бетонні труби 5, послідовно проходить через шари грубого шлаку 4, просоченого бітумом картону 3, просіяного 2 та свіжого 1 компосту.

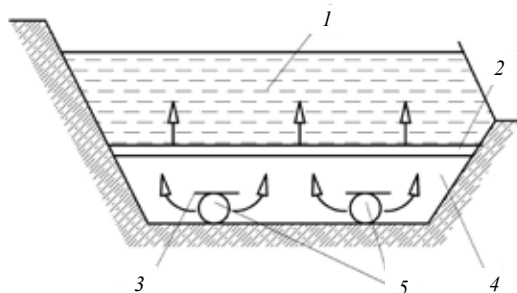


Рис. 36. Біофільтр для дезодорації повітря

Апарати другого типу, залежно від процесів, що в них відбуваються, поділяються на аеробні та анаеробні. Вони використовуються для очищення відхідних газів, що утворюються при біологічній обробці стічних вод (метану, оксиду сірки тощо). Конструктивно апарати являють собою призматичний або циліндричний конус, в якому розміщено площинне (з листів, сіток, ґрат з металу, пластмаси, тканин) або об'ємне (керамзитове, гравійне) завантаження з біоплівкою, що має вигляд слизуватих обростань, утворених бактеріями, дріжджами, грибами та іншими організмами (рис. 37). Апарати можуть бути багатосекційними, причому процеси в секціях можуть розрізнятися. Повітря, що очищується у біофільтрах, обов'язково повинно бути вологим.

Крім біофільтрів для очищення газів від з'єднань сірки застосовуються біоскрубери насадкового або барботажного типу (рис. 37) зі зрошенням водною суспензією активного мулу — колоїдної системи з живих організмів (бактерій, грибів, дріжджей тощо). У таких апаратах спільно з процесами біохімічного очищення можуть відбуватися абсорбція та адсорбція домішок.

Промивна суспензія регенерується в окремо розташованому біореакторі (рис. 38), а якщо забруднення легко піддаються біохімічному розкладанню — у нижній частині біоскрубера.

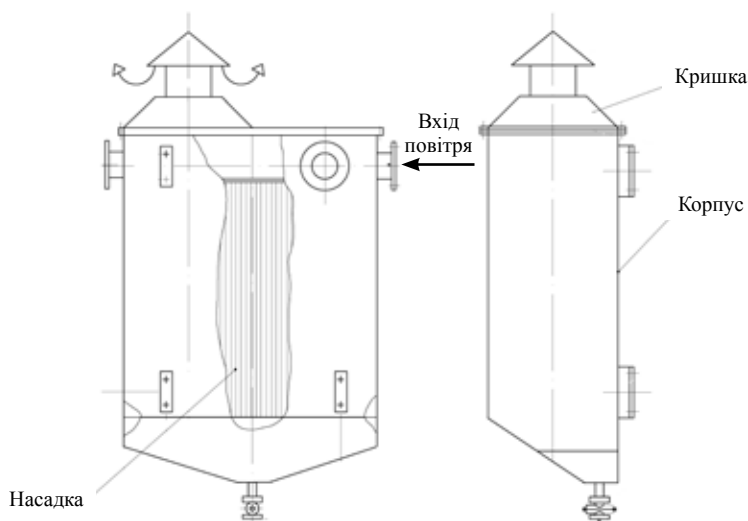


Рис. 37. Насадковий біофільтр для очищення газів

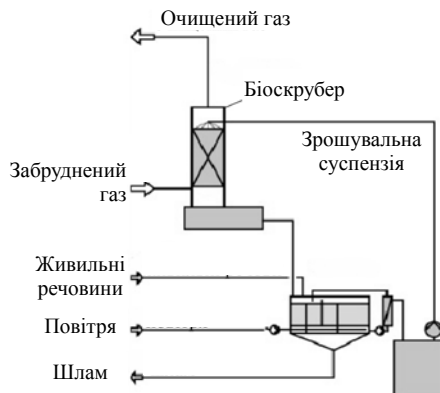


Рис. 38. Біоскрubber з регенерацією промивної рідини

На відміну від біофільтрів, що використовують органічні матеріали, у біоскруберах обов'язковим є дозування активного мулу. До початку процесу біохімічного окиснення забруднюючі речовини повинні бути переведені шляхом абсорбції у водну фазу.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

- [1] **Алиев, Г. А.** Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов [Текст] / Г. А. Алиев. — М. : Metallurgy, 1986. — 544 с.
- [2] **Балабеков, О. С.** Очистка газов в химической промышленности [Текст] / О. С. Балабеков, Л. Ш. Балтабаев. — М. : Химия, 1991. — 352 с.
- [3] Біологічна очистка та дезодорація газоповітряних викидів [Текст] : навч. посіб. / О. В. Шестопапов, Г. Ю. Бахарєва, О. М. Філенко [та ін.]. — Харків : НТУ «ХПІ», 2015. — 116 с.
- [4] **Благодатний, В. В.** Методи та засоби очищення повітря та води від забруднень [Текст] : методичні вказівки до виконання практичних робіт / В. В. Благодатний, Н. І. Магась. — Миколаїв : НУК, 2011. — 56 с.
- [5] **Благодатний, В. В.** Розрахунок природоохоронних систем та апаратів [Текст] / В. В. Благодатний, О. С. Рижков. — Миколаїв : Вид-во Торубари О. С., 2012. — 68 с.
- [6] **Вальдберг, А. Ю.** Процессы и аппараты защиты окружающей среды [Текст] / А. Ю. Вальдберг. — М. : Дрофос, 2008. — 239 с.
- [7] **Дытнерский, Ю. И.** Процессы и аппараты химической технологии [Текст] / Ю. И. Дытнерский : в 2 ч. — М. : Химия, 1995. — 466 с.
- [8] Защита атмосферы от промышленных загрязнений [Текст] / под ред. С. Калверта, Г. М. Инглунда : в 2 ч. — М. : Metallurgy, 1988. — 760 с.
- [9] **Кольцов, В. Б.** Процессы и аппараты защиты окружающей среды [Текст] : учебник и практикум для академического бакалаврата / В. Б. Кольцов, О. В. Кольцова ; под ред. В. И. Каракеяна. — М. : Изд-во Юрайт, 2014. — 588 с.
- [10] Оборудование для санитарной очистки газов [Текст] / И. Е. Кузнецов [и др.]. — К. : Техніка, 1989. — 304 с.
- [11] Оборудование и сооружения для защиты биосферы от промышленных выбросов [Текст] / А. И. Родионов [и др.]. — М. : Химия, 1985. — 352 с.
- [12] **Пирумов, А. И.** Обеспыливание воздуха [Текст] / А. И. Пирумов. — М. : Стройиздат, 1981. — 296 с.
- [13] **Рамм, В. М.** Адсорбция газов [Текст] / В. М. Рамм. — М. : Химия, 1976. — 656 с.
- [14] **Рижков, С. С.** Апарати для очищення повітря від забруднень [Текст] / С. С. Рижков, Ю. М. Харитонов, В. В. Благодатний. — Миколаїв : УДМТУ, 2002. — 36 с.

- [15] **Рижков, С. С.** Методи очищення повітря від забруднень [Текст] / С. С. Рижков, Ю. М. Харитонов, В. В. Благодатний. — Миколаїв : УДМТУ, 2002. — 56 с.
- [16] **Родионов, А. И.** Технологические процессы экологической безопасности. Основы энвайронменталистики [Текст] / А. И. Родионов, Р. Н. Клушин, В. Г. Систер. — Калуга : Изд-во Н. Бочкарёвой, 2003. — 800 с.
- [17] Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] ; под ред. А. А. Русанова. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 312 с.
- [18] **Страус, В.** Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус. — М. : Химия, 1981. — 616 с.
- [19] Техника защиты окружающей среды [Текст] / А. И. Родионов [и др.]. — М. : Химия, 1989. — 512 с.
- [20] **Тимонин, А. С.** Инженерно-экологический справочник [Текст] / А. С. Тимонин : в 2 т. — Калуга : Изд-во Н. Бочкарёвой, 2003.
- [21] **Швыдкий, В. С.** Очистка газов [Текст] / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев. — М. : Теплоэнергетик, 2002. — 640 с.
- [22] **Юдашкин, М. Я.** Оборудование установок очистки газов и вентиляции [Текст] / М. Я. Юдашкин. — К. : Высшая школа, 1991.

Навчальне видання

БЛАГОДАТНИЙ Володимир Валентинович

МАГАСЬ Наталя Іванівна

ХАРИТОНОВ Юрій Миколайович

АПАРАТИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ

Методичні вказівки

Комп'ютерне складання та верстання В.В. Торубара

Редактор Т.Б. Митрофанова

Формат 60×84^{1/16}. Умов. друк. арк. 2,2. Тираж 100 пр. Зам. №10Ц/19

Видавець та виготовлювач

**Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова**

просп. Героїв України, 9 м. Миколаїв, 54025

Свідчення суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006