

ШАНІНА Т.П.

**СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО  
СЕРЕДОВИЩА**

**Частина 1. Методи захисту атмосфери**

Конспект лекцій

ББК 28.081

Ш 20

УДК 504

*Друкується за рішенням Методичної Ради Одеського державного екологічного університету (протокол № 4 від 25.12.2008 р)*

Шаніна Т.П. Сучасні методи захисту навколишнього середовища. Частина 1. Методи захисту атмосфери: Конспект лекцій. – Одеса: ОДЕКУ, 2008. – 60с.

“Сучасні методи захисту довкілля” - навчальна дисципліна, яка входить до циклу вибіркових і викладається при підготовці на магістерському рівні за спеціальністю 8.070801 “Екологія та охорона навколишнього середовища”.

Мета вивчення даної дисципліни - формування у студента достатнього об'єму знань в області інструментального захисту довкілля, за допомогою яких можливе розв'язання проблем зниження техногенного навантаження підприємств, викиди та скиди яких містять сполуки, що забруднюють навколишнє середовище.

Після вивчення даної дисципліни студент повинен знати:

- суть основних фізичних і хімічних процесів і законів, що описують поведінку матеріальних і енергетичних забруднень антропогенного характеру;
- основні властивості забруднюючих речовин,
- принципи знешкодження забруднюючих речовин у викидах підприємств,
- принципи знешкодження забруднюючих речовин у скидах підприємств,
- класифікації інструментальних методів захисту довкілля,
- еколого-економічні характеристики інструментальних методів захисту довкілля.

повинен уміти

використати отримані знання при розробці комплексу заходів щодо зниження техногенного навантаження підприємств, викиди та скиди яких містять сполуки, що забруднюють навколишнє середовище.

Вивчення даної дисципліни засноване на знаннях, отриманих студентами при вивченні фундаментальних і спеціальних дисциплін: “Хімія”, “Основи екології”, “Техноекологія”, “Моніторинг навколишнього середовища”, “Урбоекологія”, “Економіка природокористування”, “Екологічний аудит”.

ЗМІСТ	Стор.
Класифікація сучасних методів захисту навколишнього середовища	4
Технологічні методи запобігання забрудненню атмосферного повітря.	3
Інструментальні методи запобігання забрудненню атмосферного повітря. Регенеративні і деструктивні методи знешкодження.	8
Принципова технологічна схема очищення промислових викидів. Класифікація методів очищення викидів. Повна технологічна схема очищення пилогазоповітряного потоку.	9
Інтегральні економічні характеристики засобів очищення викидів.	12
Класифікація основних забруднюючих речовин за хімічним складом Гомогенні і гетерогенні забруднюючі речовини. Властивості забруднюючих речовин, що впливають на вибір засобу знешкодження. Основні характеристики гетерогенних (твердих) часток	15
Відділення гетерогенних забруднюючих речовин. Очищення повітря у сухих інерційних пиловловлювачах (пилоосаджувальні камери, жалюзійні та інерційні пиловловлювачі, циклони).	19
Очищення викидів у фільтрах. Теоретичні основи фільтрації газу крізь пористі матеріали. Тканинні фільтри (касетні, рамкові, рулонні), зернисті фільтри. Фільтрувальні тканини та засоби їх регенерації.	22
Електричне очищення викидів. Електрофільтри. Процес очищення викиду в електрофільтрі.	27
Очищення викидів у мокрих інерційних пиловловлювачах (промивні камери, скрубери порожні та з насадкою, барботажні та пінні апарати, швидкісні пиловловлювачі зі скруберами Вентурі).	28
Відділення гомогенних забруднюючих речовин. Сорбційні методи (абсорбція, адсорбція, хемосорбція). Сорбенти, що застосовуються, засоби їх регенерації.	31
Термічні методи. Пряме спалювання у полум'ї. Доокислення органічних забруднюючих речовин. Каталітичні методи. Каталізатори, засоби їх одержання та використання. Каталітичні отрути. Області застосування термічних методів.	53
Запитання для перевірки отриманих знань:	59
Література	60

## Класифікація сучасних методів захисту навколишнього середовища

Методи запобігання забрудненню навколишнього середовища (НС) діляться на пасивні і активні.

Пасивні пов'язані із зменшенням концентрації забруднюючих речовин (ЗР) в атмосферному повітрі або водному середовищі без зміни абсолютних кількостей ЗР, що поступають в ці середовища. До таких методів відносяться розбавлення викиду атмосферним повітрям і скиду водою природного водоймища, яке здійснюється шляхом будівництва високих труб, що відводять викиди або глибоководних скидів. Існують труби, висота яких досягає 250м.

Активні методи зниження забруднення НС зменшують абсолютні кількості ЗР, розміщуваних в НС. До таких методів відносяться технологічні і інструментальні методи.

До технологічних методів зниження забруднення НС відносяться:

- перехід виробництва на нову технологію, пов'язану з утворенням меншої кількості ЗР, потрапляючих в атмосферу і гідросферу;
- перехід на менш ресурсо- і енергоємні технології;
- внесення змін в технологічний процес, які або зв'язують ЗР, що утворюються, або перешкоджають їх утворенню.

Якщо на сучасному рівні розвитку промислових технологій за рахунок технологічних методів усунути або знизити до допустимих значень викиди або скиди шкідливих речовин неможливо, вдаються до інструментальних методів очищення.

## Технологічні методи запобігання забрудненню атмосфери

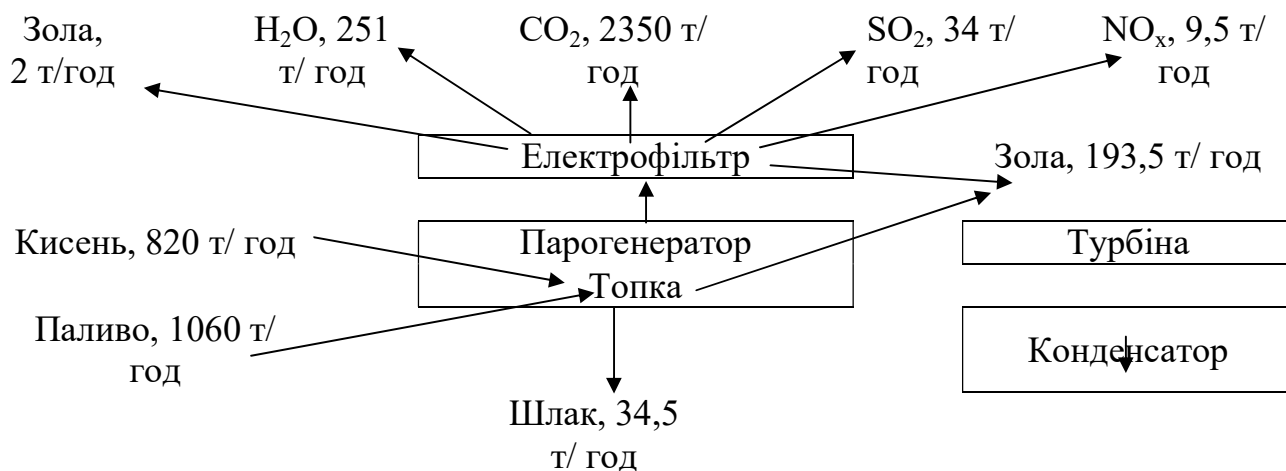
Застосування технологічних методів зменшує кількість ЗР, що утворюються в результаті проведення технологічних процесів за рахунок внесення змін в ці процеси або за рахунок переходу на нові технології.

Перевагою технологічних методів є їх надійність, незалежність від стану газоочисного устаткування, режимів його експлуатації і інших чинників, а також можливість утилізації відходів і повніше використання початкової сировини.

Зниження викидів за допомогою технологічних методів особливо ефективно, коли очищенню повинні піддаватися великі об'єми газів. Це вимагає створення громіздких і дорогих очисних установок, що позначається на економічних показниках виробництва.

Особливу увагу технологічним методам надають в теплоенергетиці.

Схема основних матеріальних потоків в працюючій ТЕС:



Працююча на твердому паливі ТЕС викидає в атмосферу газоподібних відходів в десятки разів більше, ніж маса початкового палива. В цілому газоподібні викиди ТЕС потужністю 2400 МВт складають близько 107 м<sup>3</sup>/год і містять близько 20% CO<sub>2</sub>, 0,34% SO<sub>2</sub> і 0,09% NO<sub>x</sub>.

Тому зниження викидів в атмосферу оксидів азоту і сірки на об'єктах теплоенергетики забезпечується вдосконаленням технології:

- переходом на чистіші палива,
- заміною твердого і рідкого палива на газ,
- скріпленням сірки в процесі спалювання сірковмісних твердих і рідких палив,
- застосуванням режимно-конструктивних заходів.

Найекономічнішим і доступнішим рішенням є перехід на **чисті палива**, що призводить до зниження викидів SO<sub>2</sub>. При спалюванні твердого або рідкого палива цей ефект може бути досягнутий за рахунок попередньої обробки палива з метою пониження вмісту в ньому сполук сірки.

Вугілля містить сірку в піриті і в органічних сполуках. Піритова сірка видаляється з вугілля фізичними методами при збагаченні палива, а органічна сірка – термічно або хімічно.

Фізичні методи видалення піриту включають:

- гравітаційну сепарацію, засновану на різниці щільності піриту і вугілля (5 і 1,25 г/см<sup>3</sup>, відповідно),
- розділення у важких рідинах,
- магнітну сепарацію.

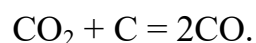
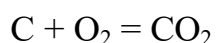
Фізичні методи дозволяють понизити вміст сірки на 10-15%, особливо, якщо пірит присутній у вугіллі у вигляді крупних включень. Для бурого вугілля характерна наявність дрібнодисперсних включень піриту.

Нафтові палива містять сірку у вигляді аліфатичних і циклічних органічних сполук. Рідке паливо знесірчують прямим або непрямим способом. У першому випадку весь продукт переробки нафти в суміші з воднем піддають каталітичній гідрообробці при підвищеній температурі (350-420°C) і тиску (10-15 МПа) в реакторі у присутності нанесеного на оксидно-алюмінієву основу каталізатора - сульфїду кобальту, нікелю або молібдену. У присутності каталізатора водень вступає в реакцію з сірчистими органічними сполуками, утворюючи сірководень і вуглеводні. Подальша сепарація суміші, що пройшла через реактор, дозволяє одержати паливо, частково знесірчене. Цей метод прямого видалення сірки з рідкого палива пов'язаний з проблемою "отруєння" каталізатора домішками ванадію, нікелю, заліза, що містяться в нафті, а також в результаті закоксування поверхні каталізатора асфальтенами нафти.

Цих недоліків частково позбавлений метод непрямого знесірчення. При цьому в результаті вакуумної перегонки або селективної екстракції від основної маси палива відділяють найважчу частину, що містить асфальтени. Одержані легкі компоненти палива знесірчують шляхом каталітичної гідрообробки, а потім змішують з важкими компонентами.

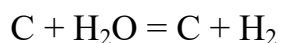
Непрямий метод дозволяє довести вміст сірки в паливі до 1%, прямий - до 0,5%, що пов'язано з тим, що в першому випадку сірка видаляється тільки з легких компонентів палива

Для очищення рідкого і твердого палива від сірки використовують їх **газифікацію** з подальшим спалюванням одержаних газів у топках котлів. Газифікацією називається процес перетворення твердих і рідких палив у газоподібне. Процес проводять в спеціальних печах - газогенераторах, які завантажують паливом і продувають повітрям. Реакція протікає з великим виділенням тепла, паливо розжарюється. Утворений CO<sub>2</sub> реагує з розжареним вугіллям, утворюючи оксид вуглецю



Оксид вуглецю є основною горючою частиною утвореного газу, який називається генераторним. Окрім оксиду вуглецю до складу генераторного газу входить азот повітря і деяка кількість вуглекислого газу.

Щоб уникнути перегріву парогенератора, в повітря вводять невелику кількість водяної пари. При продуванні через розігрітий парогенератор, утворюється газ, що складається з водню і СО



Такий газ називається водяним, його склад:  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2$ .

При заляганні вугілля тонкими пластами газифікацію проводять під землею. Ідея підземної газифікації була запропонована ще Д.І.Менделєєвим. Газифікація палив (підземна) особливо актуальна у зв'язку з виснаженням запасів нафти і газу.

Технологічним прийомом зниження вмісту оксидів сірки в продуктах згорання палив є **скріплення сірки** в сполуки, що видаляються із золою, шляхом введення речовин, здатних зв'язати діоксид сірки. Такими речовинами є вапняк, вапно і скидові вапнякові шлами.

Розрізняють метод добавок і метод спалювання в киплячому шарі. При використанні методу добавок в горючу суміш додають речовину, здатну зв'язати  $\text{SO}_2$ , наприклад, тонко подрібнений вапняк, гідроксид кальцію або доломіт. При високих температурах відбувається кальцинація вапняку. Оксид кальцію, що утворився, зв'язує  $\text{SO}_2$ . Потім утворені сульфат, сульфід, сорбент, що не прореагував, і зола відділяються від газового потоку. При такій процедурі добавка зв'язує і 10-40% оксидів азоту. Недоліком методу добавок є низька ефективність, оскільки уловлюється лише 20–40% діоксиду сірки.

Метод спалювання в киплячому шарі полягає у тому, що в топочній камері на ґратах створюють шар роздробленого вапняку певної фракції, заввишки до 1 м. Під ґрати подають повітря, що йде на горіння, а в киплячий шар частинок - паливо. У киплячому шарі розміщується також частина тепловідбірних поверхонь, що дозволяє підтримувати в шарі температуру близько  $850^\circ\text{C}$ . При такій температурі відбувається термічна дисоціація вапняку.

Потім оксид кальцію взаємодіє з сіркою спалюваного палива, утворюючи поетапно сульфід і сульфат кальцію. Після взаємодії з сіркою палива частинки киплячого шару видаляються з топки. На їх місце для збереження рівня шару в топці подається регенерований оксид кальцію з деякою кількістю свіжого вапняку.

При спалюванні палива в киплячому шарі спостерігається скріплення до 90% сірки, що знаходиться в паливі. Крім того, інтенсивний теплообмін сприяє пониженню температури в зоні горіння в порівнянні з камерним способом спалювання (метод добавок), що приводить до зменшення утворення оксидів азоту в продуктах згорання.

Вміст **оксидів азоту** в продуктах згорання палив залежить від складу палива (у меншій мірі) і режиму горіння (основний чинник). Утворення оксидів азоту відбувається за рахунок окислення азоту повітря і азотвмісних сполук палива. На вміст оксидів азоту в продуктах згорання органічних палив, відповідно до сучасних уявлень про кінетику окислення газоподібного азоту, впливає:

- рівень температур в топці;
- концентрація кисню в зоні реакції;
- час перебування газів у зоні високих температур.

Тому для зниження вмісту оксидів азоту в продуктах згорання застосовують наступні методи:

- рециркуляція димових газів;
- двоступінчасте окислення;
- зниження підігріву повітря, що подається в топку;
- розосередження зони горіння в об'ємі всієї топки;
- підвищення швидкості охолодження факела і т.д.

Суть методу рециркуляції димових газів полягає в наступному: частково охолоджені димові гази, що йдуть з топки, подаються в пальник в суміші з дмуховим повітрям або в топку при спалюванні рідкого і газоподібного палива і в пилосистему при спалюванні твердого палива. Застосування рециркуляції сприяє пониженню температури в зоні горіння, зменшенню концентрації кисню і зниженню концентрації оксидів азоту в 2—3 рази.

Метод двоступінчастого спалювання полягає у тому, що на першому ступені спалювання проводиться при недоліку повітря. Недолік в цій зоні кисню зменшує інтенсивність утворення оксидів азоту. На другому ступені у факел подається решта частини повітря, необхідного для згорання палива відповідно до прийнятого режиму. При спалюванні газу така організація топочного процесу приводить до двократного зниження викидів оксидів азоту, при спалюванні мазуту - на 30-40%. Застосування двоступінчастого спалювання для твердого палива не завжди виправдане, оскільки відбувається винесення недогорілого палива.

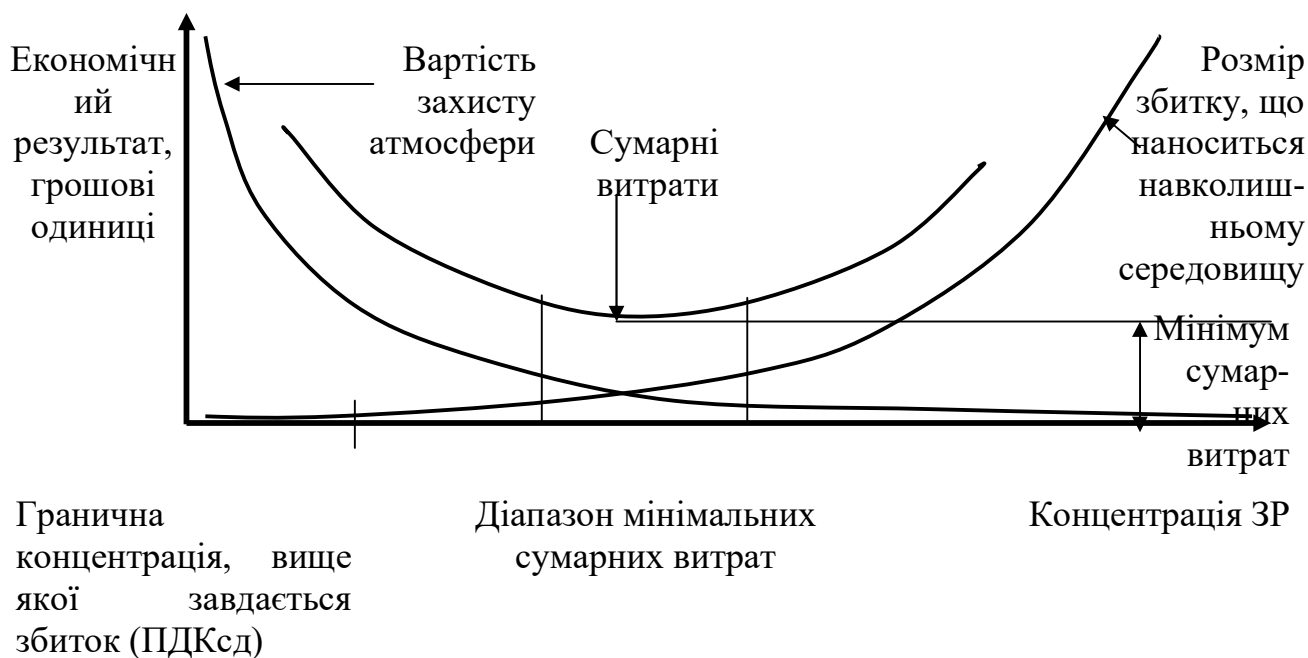
### Інструментальні методи запобігання забрудненню атмосфери

Всі методи очищення підрозділяються на:

- регенеративні (відокремлюваний компонент не змінює своїх фізичних і хімічних властивостей і може бути або повернений в основний технологічний процес, або використаний в первинному вигляді),
- деструкційні (відокремлюваний компонент в процесі очищення міняє свої фізичні і хімічні властивості).

Економічна характеристика будь-якого виду діяльності вимагає розгляду проведених витрат і одержаних доходів. На діаграмі наведено співвідношення між витратами на захист атмосфери і розміром збитку, що наноситься навколишньому середовищу.

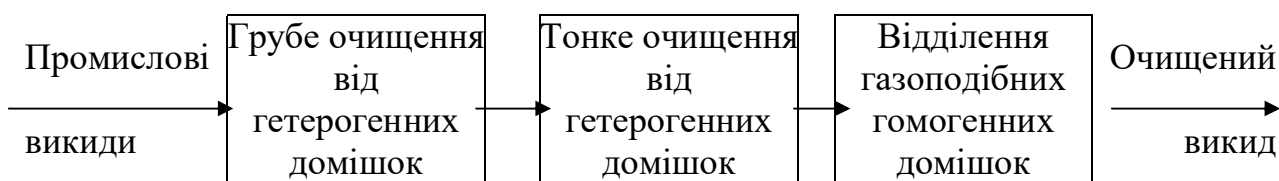




### Принципова технологічна схема очищення промислових викидів

Промислові гази містять тверді, рідкі і газоподібні домішки. Повна технологічна схема очищення складається з етапів, на яких відбувається видалення кожного виду домішок:

- видалення твердих та/або рідких (гетерогенних) домішок,
- уловлювання газоподібних (гомогенних) домішок за допомогою відповідних методів.



Технологія пиловловлювання з урахуванням її задач і цілей включає наступні стадії:

1. відведення викиду від джерела виділення пилу,
2. підготовка викиду до очищення,
3. осадження зважених частинок (власне пиловловлювання),
4. вивантаження і транспортування уловленого пилу і шламів,
5. утилізація та/або поховання уловленого пилу і шламів.

**Перша стадія** (відведення викиду) в більшості випадків визначає

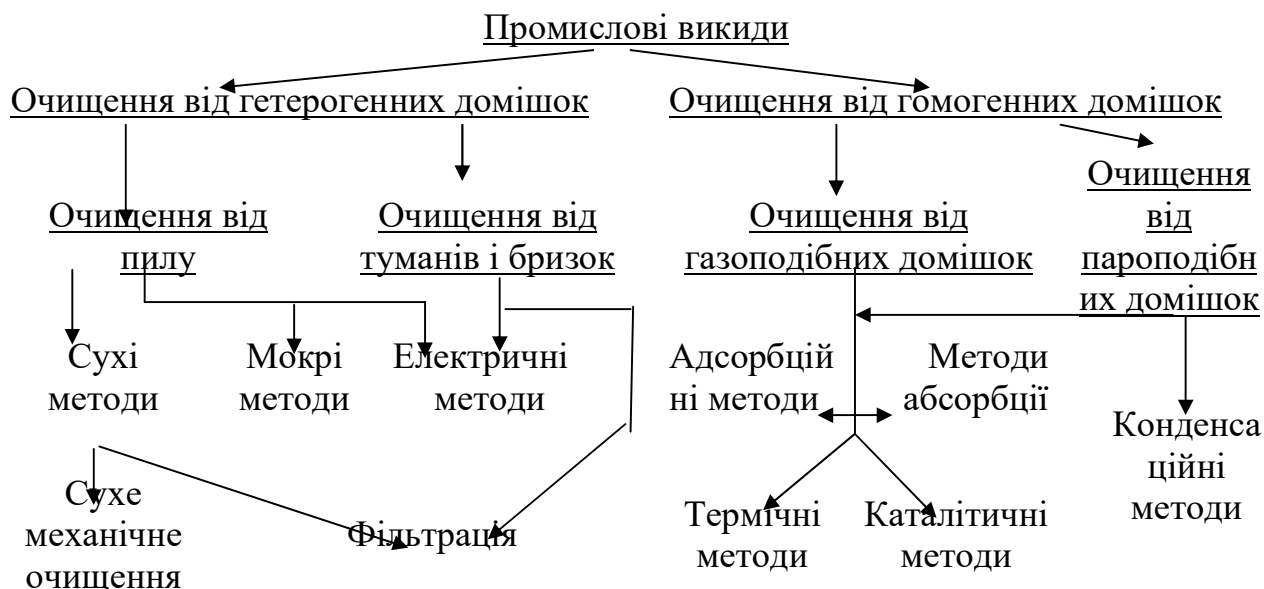
кількість домішки, що викидається в атмосферу, і витрати на очищення викиду. Якщо відведення викиду організоване ефективно, тобто локалізувати викид із забезпеченням ПДКр.з., то витрати на очищення, як правило, будуть нижчими. Якщо відведення проводиться неефективно, викиди, розбавлені повітрям, поступають на очищення в більшій кількості, для їх очищення необхідні апарати більшого об'єму, витрати будуть вищими.

**Друга стадія** може включати попереднє охолодження викиду, об'єднання викидів від групи устаткування, попереднє очищення в простих пиловловлювачах з метою забезпечення оптимальних умов для застосування апаратів тонкого очищення.

**Третя стадія** визначає доцільний механізм осадження частинок, пиловловлювальні апарати і параметри їх роботи для забезпечення необхідного ступеня очищення.

Від наявності і правильності ухвалення рішень по четвертій і п'ятій стадіях залежать ступінь очищення і виключення вторинного забруднення середовища, яке можливе як при вивантаженні сухого пилу з апаратів, так і за відсутності рішень по транспортуванню і використанню уловленого пилу. При мокрому очищенні і відсутності рішень по транспортуванню і очищенню стічних вод, що утворюються, і використуванню шламів спостерігається вторинне забруднення середовища.

### Класифікація методів очищення викидів



## Рівні класифікації систем очищення

Існує 4 рівні класифікації систем очищення викидів:

1. по складу уловлюваних речовин;
2. по складу устаткування (способу очищення);
3. по ступеню впливу на основне виробництва;
4. по режиму експлуатації.

У першому рівні класифікації виділяють:

- видалення гетерогенних ЗР;
- видалення гомогенних ЗР.

У другому рівні класифікації виділяють варіанти конструкції очисного устаткування. По видах задіяних ресурсів, виділяють варіанти з використанням води, лужних розчинів, малолетючих органічних сполук, твердих матеріалів.

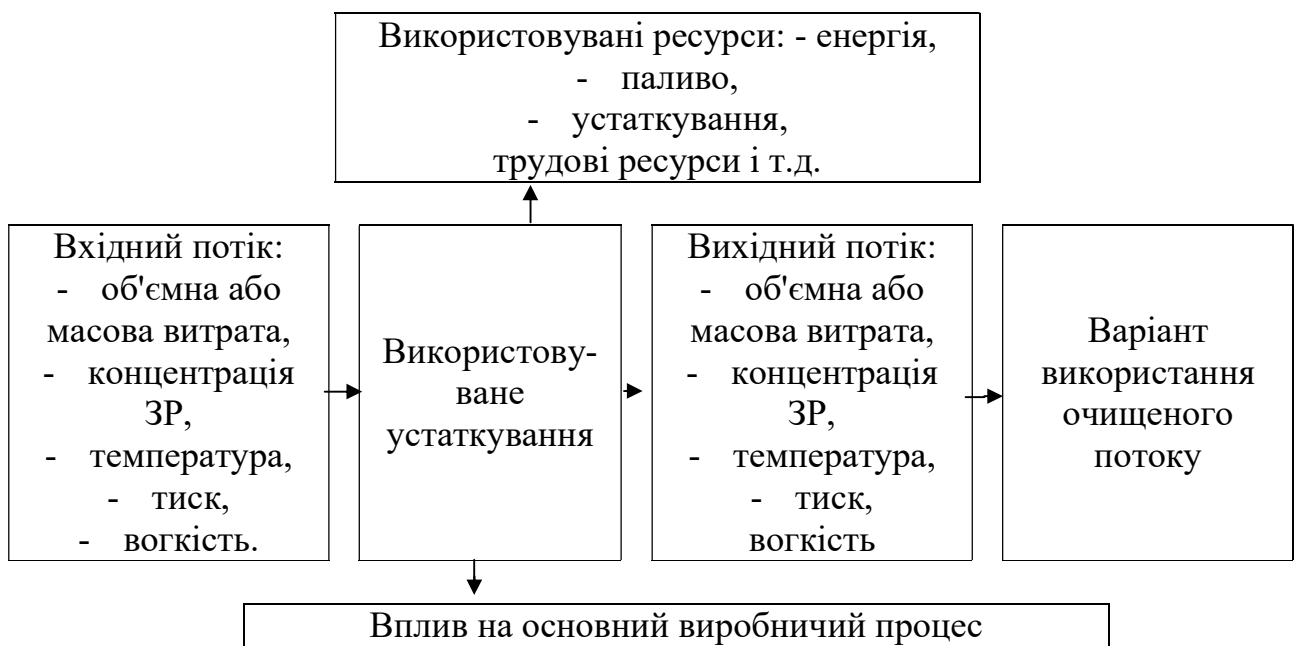
У третьому рівні класифікації виділяють:

- кількість викидів в основному виробництві (продуктивність основного устаткування),
- концентрація ЗР в технологічних газах, наявність гетерогенних ЗР в газовому потоці,
- способи транспортування, утилізації і видалення матеріалів, що утворюються в результаті очищення,
- можливості використання очищених газів в основному виробництві,
- витрати, що виникають в основному виробництві у зв'язку з використанням процесу очищення.

Четвертий рівень класифікації базується на варіантах режиму експлуатації очисного устаткування, наприклад, швидкість газового потоку, швидкість потоку рідини, напрям газового потоку, напрям потоку рідини, розмір і тип насадки (сідла, тарілки, кільця), величина гідравлічного опору.

Спосіб очищення пилогазового потоку характеризується 6-ма групами чинників:

- склад використовуюваного устаткування;
- необхідні ресурси;
- параметри вхідного потоку;
- параметри вихідного потоку;
- вплив на основний виробничий процес;
- варіант використання очищеного потоку.



### Інтегральні характеристики способів очищення викидів

1. Коефіцієнт корисної дії установок очищення (ступінь очищення) –  $\eta$   
а)

$$\eta \frac{G_1 - G_2}{G_1} (100) = \frac{C_1 V_1 - C_2 V_2}{C_1 V_1} (100)$$

$G_{1,2}$  – масова витрата газоповітряної суміші до і після очищення, кг/с, г/с;

$C_{1,2}$  – концентрація ЗР до і після очищення, кг/м<sup>3</sup>, г/м<sup>3</sup>;

$V_{1,2}$  – об'ємна витрата газоповітряної суміші до і після очищення, м<sup>3</sup>/с.

- б) якщо  $V_1 = V_2$

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C_1} (100)$$

- в) якщо  $V_1 \neq V_2$ , визначається коефіцієнт підсосу

$$K_{\Pi} = \frac{V_2}{V_1}, \text{ тоді}$$

$$\eta = \frac{C_1 - K_{\Pi} C_2}{C_1} (100)$$

2. Ступінь очищення від важених часток залежить від розмірів уловлюваних часток. Ступінь очищення визначають по фракційній ефективності – ступеню очищення від часток певного розміру.

Фракційна ефективність

$$\eta_{\Phi} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1}$$

$\Phi_{1,2}$  – вміст певної фракції в пилогазоповітряній суміші до і після очищення, %.

3. Інтегральний ступінь очищення, досягнутий в декількох послідовно встановлених апаратах, визначають по формулі

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n)$$

$\eta_1, \eta_2, \eta_n$  – ступені очищення пилогазоповітряної суміші на різних стадіях очищення.

4. - Показник санітарної ефективності очищення – показник контролю біосфери (КБ).

$$\text{КБ} = \frac{C_2}{\text{ПДК}_{\text{р.з.}}} \quad \text{або} \quad \text{КБ} = \frac{C_2}{\text{ПДК}_{\text{с.с.}}}$$

$C_2$  – залишкова концентрація ЗР в очищеному викиді

5. Санітарна ефективність (Кс.е.) роботи очисного устаткування

$$\text{К}_{\text{с.е.}} = \frac{\eta}{\text{КБ}} (100)$$

6. Коефіцієнт проскакування також характеризує ефективність очищення (ступінь неповноти уловлювання)

$$\text{К}_{\text{пр}} = \frac{C_2}{C_1} = 1 - \eta$$

Цей коефіцієнт використовують, коли потрібно оцінити кінцеву забрудненість або порівняти забруднення викиду на виході з різних очисних установок.

7. Продуктивність способу очищення викиду (g) – об'єм викиду, що проходить очищення за одиницю часу,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $\text{м}^3/\text{хв}$ ,  $\text{м}^3/\text{рік}$ .

Часто продуктивність пов'язана із ступенем очищення – підвищення g супроводжується зниженням  $\eta$  та навпаки

$$\eta = f\left(\frac{1}{g}\right)$$

8. Економічність очищення (Е) – співвідношення результату очищення (уловленої шкідливості) до експлуатаційних витрат

$$E = \frac{P}{B}, \text{ умовн.т/грн}$$

P – приведена маса ЗР, умовн.т/т

$$P = M(\text{ЗР}) \cdot A(\text{ЗР})$$

A(ЗР) – показник відносної небезпеки речовини

$$A(\text{ЗВ}) = \frac{1}{\text{ПДКс.с.}}$$

B – експлуатаційні витрати – витрати на обслуговування процесу очищення, зарплата, вартість реактивів, вартість води, електроенергії, поточних ремонтів і т.д., грн.

9. Ефективність способу очищення

$$e = \frac{\sum (\text{Зуперед.} + \Pi) - B}{K} \alpha_t$$

З<sub>уперед.</sub> - упереджений збиток, який може бути нанесений НС за час t років, грн;

Π – прибуток, одержаний від продажу уловленої ЗР, заміни ним початкової сировини і т.д. за час t років, грн;

B – витрати від експлуатації очисного устаткування, екологічні платежі і т.д., грн;

K – капітальні витрати – придбання або виготовлення очисного устаткування, контрольно-вимірювальних приладів, монтаж і т.д. (одноразові), грн;

$\alpha_t$  – коефіцієнт дисконтування (приведення різночасних витрат).

$$\alpha_t = (1 + T)^{-t}$$

T – процентна ставка банківського кредиту.

## Класифікація основних забруднюючих речовин по хімічному складу

Основний хімічний елемент	Тип сполук	Приклади
Сірка	неорганічні	туман $H_2SO_4$ , $H_2S$ , $CS_2$ , $SO_2$ , $SO_3$
	органічні	меркаптани (R-SH), діметилсульфід $(CH_3)_2S$ , діметилдісульфід $(CH_3)_2S_2$
Азот	неорганічні	$HNO_3$ , $NH_3$ , $NH_2^-$ , $CN^-$ , HCN, оксиди азоту
	органічні	пероксонітрати ( $-O-O-NO_2$ ) -, аміни (продукти заміщення Н в $NH_3$ : первинні, вторинні або третинні; по числу $NH_2$ -груп – моно-, ді-, триаміни; діметилформамід $(CH_3)_2NCHO$ $CH_3-C-O-O-NO_2$ пероксоацетилнітрат (ПАН) $\begin{array}{c}    \\ O \end{array}$ $C_6H_5-C-O-O-NO_2$ пероксибензоїлнітрат (ПБН) $\begin{array}{c}    \\ O \end{array}$
Галогени	неорганічні	$F_2$ , HF, $SiF_4$ , $Cl_2$ , $Br_2$
	органічні	хлоровані вуглеводні (ДДТ $(C_6H_4Cl)_2CH-CCl_3$ ), трихлоретилен, хлорбензол, хлороформ, трифторметан
Вуглець	неорганічні	CO, $CO_2$
	органічні	$C_mH_n$ , алифатичні, ароматичні, полігетероциклічні, спирти R-OH, фенол $C_6H_5OH$ , альдегіди $-C=O$ , кислоти $-C(=O)OH$ , $\begin{array}{c}   \\ H \end{array}$ кетони $>C=O$ , $\begin{array}{c}   \\ OH \end{array}$

## Класифікація твердих забруднюючих речовин за вмістом шкідливих компонентів

1. Пил, що містить токсичні компоненти (важкі метали і їх сполуки, токсичні біологічно активні речовини, радіоактивні речовини).

2. Пил, що не містить біологічно активних токсичних компонентів:

А. Пил з домінуючим фіброгенним ефектом (фіброз – надмірний розвиток сполучних тканин в організмі): пил, що містить азбест, кам'яновугільний пил, графіт, тальк, слюда, керамічні глини, польовий шпат, каолін, вогнетривкі

глини, пил від очищення сталевих відливок, агломераційний пил, пил з різним вмістом  $\text{SiO}_2$ .

В. Пил, що не має фіброгенного ефекту, але з яскраво вираженою дратівливою дією: бавовна, льон, прядиво, джут, шерсть, волокна базальту, скловолокна, карбонати лужних металів, обпалений вапняк.

С. Пил без фіброгенного і дратівливого ефектів: буро-вугільний, борошняний, цукровий.

### Основні характеристики гетерогенних (твердих) частинок

Промислові гази, що містять завислі частинки, є двофазною системою, яка складається з суцільної (дисперсійної) фази — газів, і дисперсної — тверді частинки або крапельки рідини. Дисперсна фаза може складатися з частинок однакової величини (монодисперсна система) або з частинок різної величини (полідисперсна система). Такі двофазні системи називаються аерозолями. Аерозолі, що містять тверді частинки з розмірами більше 10 мкм, називаються грубим пилом, 10—1 мкм — дрібним пилом, менше 1 мкм — димом. Аерозолі з рідкими частинками розмірами менше 1 мкм називаються туманом.

#### 1. Щільність частинок. Розрізняють істинну, насипну і уявну щільність.

Істинна щільність – це відношення маси речовини частинки до займаного цією речовиною об'єму без урахування об'єму пір і газових включень, які можуть бути в частинці.

Уявна щільність – це відношення маси частинки до займаного нею об'єму, з урахуванням пір і газових включень. Для гладких частинок і крапель істинна щільність дорівнює уявній.

Насипна щільність – це відношення маси свіжонасипаних частинок до займаного ними об'єму з урахуванням повітряних проміжків між частинками. У часі (при злежуванні) насипна щільність зростає в 1,5-2 рази.

#### 2. Дисперсність частинок. Розмір частинки є її основним параметром.

Частинки промислового пилу мають різну форму, можуть коагулювати і об'єднуватися в агломерати, тому поняття розміру частинок достатньо умовне. Найбільший і якнайменший розміри частинок характеризують діапазон дисперсності даного пилу. Для характеристики дисперсного складу пилу всю його масу розділяють на фракції, обмежені частинками певного розміру з вказівкою, яку частину у відсотках по масі вони складають від загальної кількості пилу. Дисперсний склад пилу зображається у вигляді інтегральних кривих. Більшість промислового пилу підкоряється нормально логарифмічному закону розподілу частинок за розмірами. Дисперсність пилу визначає швидкість і ступінь його уловлювання.



Існує класифікація пилу по дисперсності:

Група	Характеристика пилу	Розмір, мкм
I	Дуже крупнодисперсний	$n > 10$
II	Крупнодисперсний (дрібний пісок для будробіт)	$2 < n < 10$
III	Середньодисперсний (наприклад, цементний)	$0,2 < n < 2$
IV	Дрібнодисперсний (зважений атмосферний)	$0,1 < n < 0,2$
V	Дуже дрібнодисперсний	$n < 0,1$

Ступінь уловлювання пилу в різних апаратах:

Апарат	Ступінь уловлювання, %, залежно від фракції, мкм		
	50	5	1
Циклон	95	27	8
Скрубер порожнинний з насадкою	99	98	58
	100	98	80
Електрофільтр сухий	99	98	86
Скрубер Вентурі середньоенергоємний високошвидкісний	99	92	90
	100	99	92
Тканинний фільтр	100	99	99

### 3. Адгезійні і абразивні властивості.

Адгезійні властивості визначають їх схильність до зклеювання між собою і здатність налипати на поверхні устаткування. Підвищене зклеювання часток може привести до повного або часткового забивання апарату.

Чим менше розмір частинок, тим легше вони прилипають до поверхні апарату. Пил, у якому 60-70% частинок мають діаметр менше 10 мкм, веде себе як той, що злипається, хоча такий же пил з розміром частинок більше 10 мкм має хорошу сипучість. По зклеюваності пил поділяється на 4 групи:

- що не злипається (шлаковий, глина суха),
- слабкозклеюваний (коксівний, доменний),
- середньозклеюваний (торф'яний, сажа, тирса),
- сильнозклеюваний (цемент, азбест, бавовна).

Із зклеюваністю пов'язана інша характеристика пилу – його сипучість.

Абразивні властивості пилу характеризують інтенсивність зносу матеріалів при певних швидкостях газів і концентраціях пилу. Ці властивості залежать від твердості, форми, розмірів і щільності частинок. Присутність у пилу значної кількості абразивного матеріалу обумовлює необхідність захисту устаткування шляхом збільшення товщини стінок апаратів або застосування в них спеціальних високостійких до абразивного зносу вставок. Абразивний пил також унеможливує застосування як пилоочисного апарату тканинного

фільтру через швидкий знос ворсу на фільтрувальній тканині.

#### 4. Змочуваність і гігроскопічність.

Змочуваність впливає на ефективність роботи мокрих пиловловлювачів (особливо при роботі з рециркуляцією). Гладкі частинки змочуються краще, ніж частинки з нерівною поверхнею, оскільки останні більшою мірою покриті абсорбованою газовою оболонкою, що утрудняє змочування. По характеру змочування всі тверді тіла діляться на три основні групи:

- гідрофільні матеріали - добре змочувані (кварц, вапняк),
- гідрофобні - погано змочувані (графіти, вугілля, сірка),
- абсолютно гідрофобні - парафін, тефлон, бітуми.

Гігроскопічність частинок - це здатність пилу вбирати вологу. Гігроскопічність залежить від хімічного складу, розміру, форми і ступеня шорсткості поверхні частинок. Гігроскопічність сприяє уловлюванню пилу в апаратах мокрого типу.

#### 5. Електропровідність і електрзарядженість.

Електропровідність оцінюється по питомому електроопору шару пилу  $\rho$ , який залежить від властивостей окремих частинок (поверхневої і внутрішньої електропровідності, форми і розмірів частинок), а також від структури шару і параметрів газового потоку. Електропровідність шару впливає на роботу електрофільтрів.

Залежно від питомого електроопору пил ділять на 3 групи:

- низькоомний пил -  $\rho < 10^4$  Ом\*см (при осадженні на електроді дуже швидко розряджаються, що може привести до вторинного віднесення),
- пил з опором  $10^4 - 10^{10}$  Ом\*см (добре уловлюються, оскільки розрядка частинок відбувається не відразу, а протягом часу, необхідного для накопичення шару),
- пил з опором  $\rho > 10^{10}$  Ом\*см (його уловлювати складно, оскільки він утворює на електроді пористі ізолюючі шари).

Електрична зарядженість частинок впливає на ефективність уловлювання, на вибухонебезпечність і адгезійні властивості частинок. Знак заряду залежить від способу їх утворення, хімічного складу, властивостей речовини, з якою вони стикалися.

#### 6. Здатність до самозагорання і утворення вибухонебезпечних сумішей з повітрям.

Горючий пил внаслідок сильно розвиненої поверхні контакту частинок з киснем повітря здібний до самозагорання і утворення вибухонебезпечних сумішей з повітрям. Здатність до самозаймання має пил з органічних речовин, а також пил металів.

Розмежують нижню і верхню концентраційні межі вибуховості, поза якими суміші не є вибухонебезпечними. Ці межі змінюються залежно від температури і тиску суміші, вмісту інертних речовин.

Класифікація по вибухо- і вогненебезпечності сумішей горючого пилу з повітрям:

1 клас (найбільш вибухонебезпечні) - речовини з нижньою межею вибуховості до  $15 \text{ г/м}^3$  (цукор, торф, ебоніт, сірка, каніфоль, крохмаль).

2 клас (вибухонебезпечні) - речовини з нижньою межею вибуховості від 15 до  $65 \text{ г/м}^3$ .

3 клас (найбільш вогненебезпечні) складають речовини з температурою самозаймання до  $250^\circ\text{C}$  (тютюнова –  $205^\circ\text{C}$ , елеваторна –  $245^\circ\text{C}$ ).

4 клас (вогненебезпечні) -- речовини з температурою самозаймання вищі  $250^\circ\text{C}$  (деревна тирса -  $275^\circ\text{C}$ ).

Максимальні вибухонебезпечні концентрації зваженого в повітрі пилу  $700\text{-}800 \text{ г/м}^3$ . Інтенсивність вибуху залежить від його хімічного складу, термічних властивостей, від розмірів і форми частинок, їх концентрації в повітрі, від вологості і складу газів, відносного вмісту інертного пилу.

#### Відділення гетерогенних забруднюючих речовин.

Пилоловлювачі застосовують для уловлювання з викидів пилу II, III і IV груп по дисперсності. V група, як правило, в пиловловлювачах ефективно не уловлюється через високу дисперсність.

Для знешкодження гетерогенних домішок викидів – пилу і туманів – використовують сухі, мокрі і електричні методи. Методи очищення промислових викидів від зважених в них частинок об'єднані в 4 основні групи:

- сухе механічне очищення,
- фільтрація,
- мокра газоочистка,
- електричне очищення.

#### Класифікація найбільш використовуваних пиловловлювачів

Клас пиловловлювачів	Розмір ефективно уловлюваних частинок, мкм	Ефективність уловлювання, % по групах дисперсності пилу				
		I	II	III	IV	V
I	>0,3-0,5	-	-	-	99,9-80	<80
II	>2	-	-	99,9-92	92-45	-
III	>4	-	99,9-99	99-80	-	-
IV	>8	>99,9	99,9-95	-	-	-
V	>20	>99	-	-	-	-

### Приклади пиловловлювачів:

- I класу – високонапірні труби Вентурі;
- II – середньонапірні труби Вентурі, тканинні фільтри, електрофільтри;
- III – тканинні фільтри, мокрі інерційні пиловловлювачі;
- IV – високоефективні циклони;
- V – пилоосаджувальні камери, циклони великої пропускної спроможності.

### Сухі механічні пиловловлювачі

#### Загальні достоїнства:

- простота конструкції,
- безвідмовність в роботі як при звичайних, так і при високих температурах,
- можливість регенерації відокремленої фази.

Сухі механічні пиловловлювачі можна розділити на 3 групи:

- пилоосаджувальні камери, дію яких засновано на використанні сили тяжіння (гравітаційних сил);
- інерційні апарати, дію яких засновано на використанні інерційних сил;
- циклони, дію яких засновано на використанні відцентрової сили.

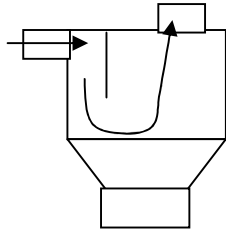
**Пилоосаджувальні камери.** Чим вище швидкість осадження і час перебування в камері, тим вище ефективність осадження. Тому пилоосаджувальні камери громіздкі споруди, розраховані на осадження крупних частинок, виготовлені з монолітного залізобетону, цегли, металу. Діаметр їх майже дорівнює висоті (близько 10 м). Швидкість пилогазового потоку в них 0,2-1,5 м/с, гідравлічний опір 50-150 Па. Можуть працювати при початковій запиленості викиду в декілька сотень грамів в куб.метрі. Ступінь очищення залежить від властивостей пилу і дорівнює 40-80%. Ефективність очищення газу залежить:

- від швидкості осідання частинок пилу;
- від швидкості пилогазового потоку;
- від розмірів камери.

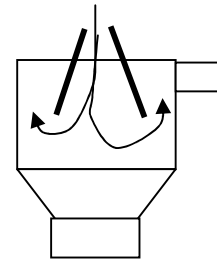
Для підвищення ефективності роботи камери обладнують горизонтальними полицями, ланцюговими завісами або металевими перегородками, закріпленими поперемінно на верхній частині і на днищі камери. В цьому випадку до дії гравітаційних сил додається дія інерційних сил. Швидкість пилогазового потоку в них 0,2-1,5 м/с, гідравлічний опір 50-150 Па, ступінь очищення не перевищує 50-60%. Такі споруди ефективні як перший ступінь очищення, що розвантажує роботу наступних стадій очищення.

**Пиловловлювачі інерційної дії** використовують як гравітаційні, так і інерційні сили, що виникають при повороті пилогазового потоку, що рухається.

Швидкість викиду складає 5-15 м/с. Гідравлічний опір не перевищує 250 Па, якість очищення не перевищує 70-75%.

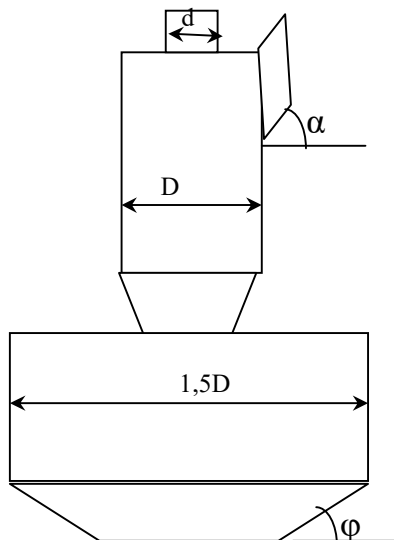


з перегородкою



з конусом, що розширюється

**Циклони** – один з найпоширеніших пиловловлювачів. Частинки пилу в циклоні відділяються від пилогазоповітряного потоку під дією відцентрової сили при обертально-поступальній ході викиду. При цьому гетерогенні частинки відкидаються до стінок циклону і з частиною газів потрапляють у бункер. Гази, що потрапили в бункер і звільнилися від пилу повертаються в циклон через центральну частину пиловідбійного отвору і утворюють внутрішній потік очищеного газу, що виходить з апарату. Відділення частинок від газів, що надійшли до бункера, відбувається при зміні напрямку руху газів на  $180^\circ$  під дією сил інерції. При порушенні герметичності бункера у міру руху цієї частини газів у бік вихлопної труби до них приєднується частина викиду, що не пройшов через бункер.



Існують два різновиди: циліндрові і конічні циклони.

Для циліндрових циклонів характерна подовжена циліндрова частина корпусу. Кут нахилу вхідного патрубку ( $\alpha = 11^\circ, 15^\circ, 24^\circ$ ) входить в назву циклону (ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24). Відношення діаметру вихлопної труби до діаметра циклону постійне ( $d=0,59D$ ). Всі розміри циклонів дають у частках  $D$ . Це високопродуктивні очисні споруди, можуть застосовуватися в групах. Призначені для відділення сухого пилу. Їх рекомендують використовувати для попереднього очищення викидів перед фільтрами.

У конічних циклонах подовжена конічна частина, характерне мале відношення діаметрів вихлопної труби і корпусу циклону (0,33 і 0,34), що теж відображається в назві циклону (СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М). Можуть використовуватися для відділення сажі. Це високоефективні апарати, при рівній виробничій спроможності більше циліндрових, але мають більший гідравлічний опір.

У всіх циклонах бункери мають циліндрову форму. Для циліндрових циклонів бункер має діаметр  $1,5D$ , для конічних –  $1,1-1,2D$ . Висота циліндрової частини бункера дорівнює  $0,8D$ , а днище має кут  $60^\circ$  ( $\varphi$ ).

Циклони ефективно працюють для частинок з діаметром не менше 15-20 мкм, викид не повинен мати температуру вище  $400^\circ\text{C}$ . Продуктивність циклону залежить від його діаметра (пряма залежність). Ефективність очищення падає із збільшенням кута  $\alpha$ .

Достоїнства циклонів:

- відсутність рухомих деталей;
- уловлювання пилу в сухому вигляді (можливість повернення її в технологічний процес);
- відсутність шламу;
- прості у виготовленні.

При великій витраті викиду і великому його запыленні застосовують групи циклонів або батарейні циклони.

Групи циклонів мають загальні підведення викиду, збір очищеного газу і бункер. Вони мають кругове компонування або розташовуються в ряд по 2.

Батарейні циклони – це пиловловлюючі апарати, складені з великого числа паралельно встановлених циклонних елементів малого діаметру (до 300 мм), об'єднані в одному корпусі і мають загальні підведення і відведення викиду і бункер. Батарейний циклон може бути розташований під будь-яким кутом нахилу. Ефективність батарейного циклону звичайно на 20-25% нижча від ефективності окремого елемента.

#### Очищення викиду фільтрацією.

Фільтрація – процес очищення пилогазового потоку від гетерогенних забруднюючих речовин за допомогою пористих середовищ. Відділення частинок відбувається під впливом наступних ефектів:

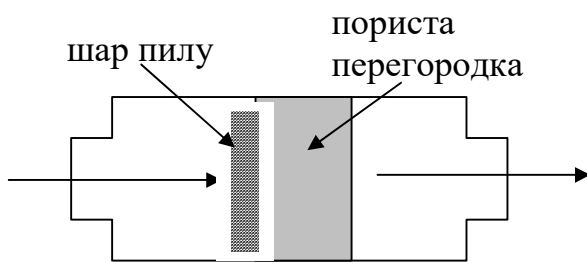
- торкання – частинка переноситься уздовж лінії потоку газу до перешкоди. Коли частинка наближається до перешкоди на відстань, меншу від її радіусу, відбувається торкання і захоплення;
- інерційне захоплення – частинка рухається по лінії потоку в обхід перешкоди, проте, під дією сил інерції вона відхиляється і стикається з перешкодою. Вірогідність подібного захоплення тим більше, чим більше розміри частинки, тому дія інерції мало позначається на частинках з діаметром менше 1 мкм;
- електростатичне осадження – обумовлено тяжінням різнойменних зарядів частинки і перешкоди;
- термофорез – частинка зміщується до перешкоди під дією температурного градієнта;
- гравітаційне осадження – відбувається під дією тяжіння між частинкою і

волоконном або під дією гравітаційних сил;

➤ ситовий ефект – якщо розміри частинки дуже великі для того, щоб проникнути в пори або канали в перегородці, відбувається осадження.

Фільтрацією видаляються частинки самих різних розмірів, але найбільш ефективний процес тонкого очищення.

При фільтрації твердих частинок ефективність і опір фільтру змінюються в часі. При цьому відбувається складний процес, коли порові канали фільтруючої перегородки заповнюються з боку входу викиду аерозольними



частинками. Фільтр є корпусом, розділеним пористою перегородкою – фільтроелементом. Частинки домішок осідають на входній частині пористої перегородки і затримуються на ній, утворюючи шар. Пиловий шар має пори, розміри яких співпадають з розміром

частинок. Шар пилу, що осів, уловлює частинки з викиду практично повністю. Основна маса частинок не проникає всередину перегородки, а осідає зовні шару, внаслідок чого товщина пилового шару зростає. Наявність на фільтруючій перегородці шару пилу не тільки підвищує ефективність уловлювання в порівнянні з чистим (незапиленним) фільтром, але і збільшує його гідравлічний опір, який може у багато разів перевищувати опір чистого фільтру, тому в часі виникає необхідність руйнування і видалення пилового шару, тобто процес фільтрації припускає періодичну регенерацію фільтру.

Регенерація фільтруючих поверхонь визначається адгезією – прилипанням частинок пилу до поверхні фільтруючої перегородки і аутогезією – злипанням частинок в шарі. Сумарна дія цих чинників утримує пиловий шар на фільтруючій поверхні навіть у разі відключення фільтру від газового навантаження (звично перед регенерацією).

Класифікація фільтрів заснована на типі фільтруючої перегородки, конструкції і його призначенні, глибині очищення і т.д.

По типу перегородки фільтри бувають:

➤ із зернистим шаром (нерухомо вільно насипаним зернистим матеріалом, псевдозрідженим шаром). Фільтруючі зернисті шари складаються із зерен різної форми. Для очищення пилогазоповітряної суміші від крупних домішок (очищення викидів від пилу механічного походження – дробарок, решіток, млинів) використовуються фільтри з гравію. Такі фільтри дешеві, прості в експлуатації і забезпечують високу ефективність очищення (до 99%) від крупнодисперсних домішок;

➤ з гнучкими пористими перегородками (тканини, повсть, волоконні мати, губчаста гума, пінополіуретан і т.д.). Широко використовуються перегородки з синтетичних волокон, що мають високу міцність, підвищену теплову і хімічну стійкість.

Товстволоконні фільтри мають значення як фільтри попереднього очищення. Вони значно дешевше, ніж фільтри для тонкого очищення, їх можна легко замінити або регенерувати. Чистий фільтр повинен майже повністю уловлювати частинки крупніше 1 мкм. Після часткового забивання фільтри стають ефективнішими для дрібніших частинок (якщо початковий коефіцієнт проскакування рівний 50% для частинок з діаметром 0,5 мкм, то кінцевий коефіцієнт проскакування для них дорівнює 1%). При збільшенні гідравлічного опору до 500 Па робота фільтра економічно недоцільна. При вхідній концентрації пилу 0,5 – 1 мг/м<sup>3</sup> фільтри міняють 2-4 рази на рік.

Для тонкого очищення застосовують тонковолокнисті фільтри, часто – з нетканих матеріалів (шару волокон з хаотичним їх розташуванням) – повсть. Тонкість і ефективність очищення з використанням повсті вищі, ніж у фільтруючих елементів з тканин, виготовлених із тих же ниток. Гідравлічний опір чистого фільтра 200-300 Па, забитого – 700-1500 Па. Ефективність очищення – 99% для частинок з діаметром 0,05-0,5 мкм. Регенерація таких фільтрів неможлива. Вони призначені для тривалої безперервної роботи терміном 0,5 - 3 років при вхідній концентрації твердих частинок не більше 0,5 мг/м<sup>3</sup>.

Глибокі волоконні фільтри складаються з першого шару грубих волокон і замикаючого тонковолокнистого фільтра. Така конструкція забезпечує велику тривалість роботи в порівнянні з фільтрами тонкого очищення. Іноді такі фільтри називають «фільтри довготривалого використання».

➤ з напівжорсткими пористими перегородками (в'язані або ткані металеві сітки, пресовані спіралі і стружка і т.д.). Найбільш поширені дротяні сітки, виготовлені з різних сортів сталі, міді, бронзи, латуні, нікелю і ін. Такі фільтри працюють в широкому діапазоні температур (від 0 до 800°C) в агресивних і неагресивних середовищах. Тонкість очищення визначається розміром вічка сітки. Зменшення розмірів вічок підвищує тонкість очищення, але веде до підвищення гідравлічного опору. При значних перепадах тиску на сітках можуть з'являтися деформації, вічка втрачають форму і виникає місцеве збільшення прохідних отворів. Фільтроелементи з сіток, що мають деякі переваги перед фільтроелементами з тканин і повсті, поступаються їм в тонкості очищення (тонкість очищення досягає 15 мкм);

➤ з жорсткими пористими перегородками (пориста кераміка, пористі метали і т.п.). У всіх розвинених країнах ведуться роботи по створенню фільтрів з пористих жорстких матеріалів. Їм властиві висока міцність і пластичність. Залежно від вживаного матеріалу можна забезпечити необхідні корозійну стійкість, жаростійкість і т.п. Металеві фільтри стійкі до різких коливань температури, технологічні (зварюються, паяються, механічно обробляються на верстатах, можуть бути вбудовані в газохід будь-якої конфігурації). Їх все більше застосовують для очищення.



За конструктивними ознаками фільтри підрозділяють на:

- рукавні,
- пористі (рамкові і каркасні),
- рулонні.

Рукавні фільтри найбільш поширені в сухому очищенні викидів. У корпусі фільтра встановлюють необхідну кількість рукавів, у внутрішню (у деяких різновидах – в зовнішню) порожнину яких подається запилений викид. Домішки осідають на поверхні фільтра і створюють пиловий шар. Досягши максимально допустимого перепаду тиску на фільтрі його відключають і проводять регенерацію струшуванням рукавів та/або продуванням стислим газом. При очищенні тканини видаляється значна частина пилового шару, але всередині тканини залишається достатня її кількість, що забезпечує високу ефективність очищення викиду у фільтрі після його регенерації. Рукави у фільтрі можуть мати діаметр 12-300 мм і довжину 2000-6000 мм. Для тканинних фільтрів доцільні невеликі швидкості фільтрації ( $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{хв}$ ): для синтетичних тканин 0,3-0,8; для натуральних 0,6-1,2. Вищі швидкості приводять до швидкого зношування тканин в результаті частих регенерацій. Гідравлічний опір фільтру перед регенерацією досягає 750-1500 Па. Регенерація імпульсним продуванням відбувається без відключення фільтра з циклу фільтрації. Ефективність рукавних фільтрів вельми висока: залишкова концентрація пилу 5-50  $\text{мг}/\text{м}^3$  при вхідній її концентрації 5-15  $\text{г}/\text{м}^3$ . У великогабаритних фільтрах великої продуктивності може бути зібрано декілька сотень рукавів в одному корпусі. При значній запиленості викиду рукавні фільтри рекомендують використовувати як другий ступінь очищення (наприклад, після циклону). Недолік рукавних фільтрів – швидкий знос матеріалу. При виході з ладу одного рукава навіть у великому апараті його ефективність різко знижується. Визначення секції з пошкодженим рукавом і його заміна займає значний час, протягом якого очищення буде недостатнє. До такого ж результату може привести недостатня герметичність через неякісний монтаж вузлів. Недостатня ефективність систем регенерації веде до підвищення гідравлічного опору, що збільшує витрату енергії і може привести до зростання залишкової запиленості або до необхідності частішої регенерації, що негативно позначається на терміні служби рукавів. Перевищення температури над нормативними значеннями також знижують довговічність рукавів. Таким чином, апарат, що є потенційно високоефективним, але недостатньо надійним, може в середньому давати гірші результати, ніж менш ефективний, але надійніший.

Пористі фільтри мають обмежений термін служби через швидке засмічення вічок фільтруючого матеріалу і утворення шару осаду на його вхідній частині, що вимагає часті зміни фільтроелементів або їх періодичної регенерації. Цей недолік частково усувається використанням рулонних фільтрів.

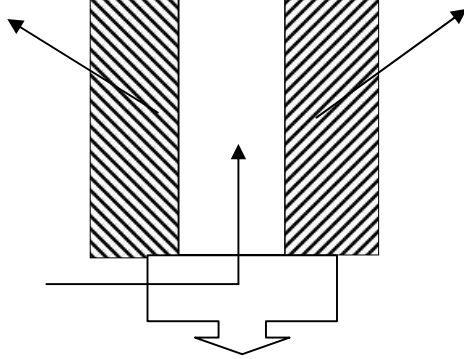
Рулонні фільтри застосовують при очищенні викиду із запиленістю менше 10  $\text{мг}/\text{м}^3$ . Рулонні фільтри звичайно не регенерують. Такий фільтр є камерою, в

одній частині якої розташована котушка з намотаним на неї чистим фільтроелементом, що переміщається через отвір для проходу викиду, і що намотується на котушку, розташовану в іншій частині камери, у міру забивання фільтру.

### Туманоуловлювачі

Для очищення газів від туманів кислот, лугів, мастил і інших рідин

використовують волоконні фільтри, принцип дії яких заснований на осадженні крапель на поверхні пір з подальшим стіканням рідини під дією сил тяжіння.



Туманоуловлювачі ділять на низькошвидкісні (швидкість викиду не більше 0,2 м/с), в яких переважає механізм дифузійного осадження крапель, і високошвидкісні (швидкість викиду від 0,2 до 2,5 м/с), де осадження відбувається, головним чином, за рахунок інерційних сил.

Волоконні низькошвидкісні туманоуловлювачі забезпечують високу ефективність очищення (до 99,9%) викиду від крапель розміром менше 3 мкм і повністю уловлюють краплі більшого розміру.

Волоконні шари формуються набиванням скловолокна або полімерних волокон діаметром 10-40 мкм.

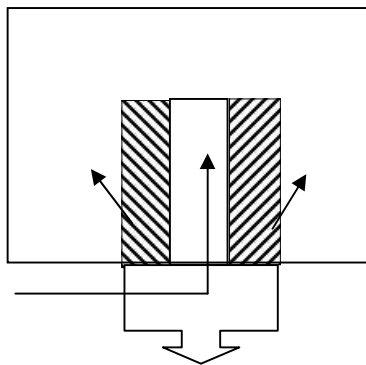
Товщина шару 5-15 см. Гідравлічний опір сухих фільтроелементів дорівнює 200-1000 Па.

Високошвидкісні туманоуловлювачі мають менші габаритні розміри і забезпечують ефективність очищення в 90-98% при гідравлічному опорі 1500-2000 Па від туману з краплями діаметром менше 3

мкм. У якості фільтруючого елемента використовують повсть з поліпропіленових волокон, які працюють в середовищах розбавлених і концентрованих кислот і лугів.

Коли діаметр крапель туману дорівнює 0,6-0,7 мкм і менше, для досягнення прийнятної ефективності очищення доводиться збільшувати швидкість фільтрації до 4,5 - 5 м/с, що приводить до помітного винесення бризок з вихідної сторони фільтроелемента (він виникає вже при швидкостях потоку 1,7-2,5 м/с). Зменшити його можна застосуванням уловлювачів бризок в конструкції туманоуловлювачів.

При експлуатації туманоуловлювачів відбувається саморегенерація фільтра за рахунок мимовільного стікання крапель уловленої рідини при їх укрупненні в результаті злиття під дією гравітаційних сил.



## Очищення викиду в електрофільтрах

Електрофільтри застосовуються для очищення викидів як від твердих, так і від рідких частинок і, відповідно, підрозділяються на сухі і мокрі. Електрофільтри відрізняються від всіх інших високоефективних пиловловлюючих апаратів низькими питомими енерговитратами. Питомі витрати енергії складають 0,36-1,8 МДж (0,1-0,5 кВт·год.) на 1000 м<sup>3</sup> викиду. Проте питомі капітальні витрати для установок електричного очищення зростають із зменшенням їх одиничної продуктивності. По цих міркуваннях сухі електрофільтри застосовують, якщо кількість викидів, що очищаються, більше 80-100 тыс.м<sup>3</sup>/год. Мокрі електрофільтри застосовують для очищення менших кількостей викидів.

Електрофільтри складаються з осаджувальних (звичайно « + ») і коронуючих (звичайно « - ») електродів, до яких підведено постійний струм високої напруги. Виникаюча різниця потенціалів викликає появу коронного розряду на коронуючому електроді. Коронний розряд виникає досягнувши певної напруженості електричного поля, яка носить назву «критичної» або «початкової». Для повітря при 20°C і атмосферному тиску вона дорівнює 15 кВ/см. Розряд не розповсюджується на весь газовий проміжок, але в його зоні утворюються іони і електрони. Електрони рухаються до осаджувальних електродів, по дорозі осідають на поверхні частинок пилу і заряджають їх. Частинки пилу притягуються до осаджувальних електродів, розряджаються на них і осідають на дно електрофільтру.

Процес електричного очищення можна розділити на стадії:

- 1 – придбання заряду поверхнею зважених частинок,
- 2 – рух їх до осаджувальних електродів,
- 3 – осадження частинок на осаджувальних електродах,
- 4 – видалення осаджених частинок.

При збільшенні напруги на електродах вище критичної, збільшується струм коронного розряду. При цьому в нормально працюючому електрофільтрі інтенсифікують процеси відділення зважених частинок, тобто зростає ефективність їх уловлювання. Але напруга на електродах може досягти значення, при якому відбудеться пробій міжелектродного простору іскровим або дуговим розрядом.

Ефективність роботи електрофільтрів досягає 99-99,9% при концентрації пилу у викиді більше 50 г/м<sup>3</sup> при гідравлічному опорі менше 150 Па. Робоча температура може перевищувати 500°C.

Недоліки електрофільтрів:

- великі капітальні витрати через металоємність апаратів;
- електрофільтр займає велику площу;
- необхідне електричне господарство для отримання постійного струму і підвищення різниці потенціалів;

➤ висока чутливість процесу очищення до відхилень від технологічного режиму і незначних механічних дефектів устаткування.

Достоїнства:

➤ досягається висока ефективність при очищенні великих витрат викидів (до 1000000 м<sup>3</sup>/год).

Електрофільтри не можуть бути використані:

➤ для очищення від пилу з великим питомим опором (більше 10<sup>10</sup> Ом·см), оскільки частинки на осаджувальних електродах розряджаються дуже повільно;

➤ для очищення з можливим утворенням вибухонебезпечних середовищ.

### Очищення викидів у мокрих інерційних пиловловлювачах

Мокре очищення викидів полягає в промиванні викиду рідиною, що вимиває гетерогенні домішки. Їх осадження відбувається на поверхні крапель, газових міхурів або плівок рідини. Для зменшення кількості відпрацьованої рідини при роботі мокрих апаратів застосовується її часткова рециркуляція або замкнута система водопостачання.

Достоїнства мокрих пиловловлювачів:

- вищий ступінь очищення, ніж в сухих пиловловлювачах;
- можливість одночасного пиловловлювання, охолодження газів і абсорбція газоподібних домішок;
- можливість використання при очищенні вологих викидів;
- можливість використання при небезпеці самозагорання і вибухів викидів або уловленого пилу.

Недоліки мокрих пиловловлювачів:

- неможливість повернення уловленого матеріалу в технологічний процес;
- необхідність створення системи водопостачання;
- утворення шламів і необхідність їх переробки;
- утворення відкладень в апаратах;
- необхідність виготовлення устаткування з антикорозійних матеріалів.

За аеродинамічними властивостями мокрі пиловловлювачі ділять на:

- низьконапірні (з гідравлічним опором до 1500 Па),
- середньонапірні (1500-4500 Па),
- високонапірні (з гідравлічним опором більше 4500 Па).

### *Низьконапірні апарати*

До простих апаратів мокрого очищення відносяться зрошувані газоходи, промивні камери і порожнисті форсункові скрубери.

При витраті рідини до 6-8 л/м<sup>3</sup> для частинок з діаметром більше 10 мкм досягається ступінь очищення 90%, але мокре очищення малоефективне для частинок з діаметром менше 5 мкм.

У зрошуваних газоходах за допомогою форсунок створюються водяні завіси. Витрата води складає 0,1-0,3 л/м<sup>3</sup>.

Промивні камери є розширеннями в газоходах, найчастіше прямокутні. У них в шаховому порядку встановлені форсунки.

Порожнистий форсунковий скрубєр є колоною круглого або прямокутного перетину, в якій здійснюється контакт між викидом, що очищається, і краплями рідини. Зрошуюча рідина подається під тиском 300-400 кПа, питома витрата рідини складає 10 л/м<sup>3</sup>. Висота скрубєра дорівнює 2,5 D, швидкість викиду 0,6-1,5 м/сек. Ступінь очищення складає 90-92%.

За напрямком руху викидів і рідини порожнисті скрубєри діляться на протиточні, прямоточні і з поперечним підведенням рідини. Звичайно застосовують протиточні скрубєри і скрубєри з поперечним підведенням рідини, в яких рідина вводиться перпендикулярно напрямку руху викиду, що очищається.

Краплі зрошуючої рідини повинні бути достатньо крупними, щоб їх не виносив очищений викид, швидкість якого звичайно дорівнює 0,6-1,2 м/с. Гідравлічний опір порожнистого скрубєра вельми малий, у відсутності уловлювачів бризок він не перевищує 250 Па.

#### Насадочні промивники.

Насадочні промивники це є колони, заповнені тілами різної форми, засипаними в колону на опорні ґрати безладно або укладеними правильними рядами (регулярна насадка) і зрошувані зверху рідиною. Як насадка використовуються галька, кільця з перегородками, кільця Рашига, сідла Берля, кульки з пластмаси, скло, гуми. Викид, що очищається, проходить по пустотах між елементами насадки, багато разів міняється напрям викиду, збільшується час контакту з поверхнею насадки, покритої плівкою рідини. Ефективність очищення для часток діаметром більше 2 мкм досягає 90%. Продуктивність досягає 3000-10000 м<sup>3</sup>/год при гідравлічному опорі 300-1400 Па. Через часте забивання насадки ці скрубєри в даний час мало застосовуються для очищення викидів від пилу.

#### Барботажні і пінні пиловловлювачі.

У барботажних апаратах викид, що очищається, у вигляді міхурів проходить через шар рідини. Через велику площу зіткнення міхурів з рідиною викид звільняється від зважених частинок. Ефективність такого устаткування велика при уловлюванні частинок з діаметром більшим, ніж 5 мкм. Продуктивність барботажних апаратів невелика, тому застосовуються вони порівняно рідко.

Ширше в промисловості застосовують пінні апарати. Режим роботи устаткування залежить від швидкості подачі пилогазоповітряної суміші на очищення. При швидкості подачі до 1 м/с спостерігається барботажний режим

роботи. Збільшення швидкості викиду до 2-2,5 м/с супроводжується виникненням пінного шару над рідиною, що приводить до підвищення ефективності очищення викиду і винесення бризок з апарату. Пінний скруббер забезпечує ступінь очищення у 95-96% при витраті рідини 0,2-0,5 кг/м<sup>3</sup>. Гідравлічний опір рівний 300-500 Па при продуктивності апарату 15000-60000 м<sup>3</sup>/год.

### *Середньо- і високонапірні апарати*

#### **Швидкісні апарати мокрого очищення викидів.**

До швидкісних апаратів мокрого очищення викидів відносяться скрубери Вентурі – велика група апаратів, загальною для яких є наявність труби-розпилювача, в якій здійснюється інтенсивне дроблення викидом, що очищається, рухомим з високою швидкістю (40-150 м/с), рідини, що його зрошує і встановленого за нею уловлювача крапель.

Скрубери Вентурі – найефективніші з апаратів мокрого очищення. Очищення можливе при температурі викиду до 400°C. Найбільшого впливу на ефективність очищення надає швидкість викиду в горловині труби Вентурі і питоме зрошування. У горловині відбувається розгін викиду від вхідної швидкості (15-20 м/с) до швидкості у вузькому перетині сопла до 200 м/с і більше. Процес осадження частинок пилу на краплях рідини обумовлений масою рідини, розвиненою поверхнею крапель і високою відносною швидкістю частинок пилу і рідини у вузькій частині сопла. Оптимальне співвідношення між швидкістю викиду в горловині труби-розпилювача і питомим зрошуванням специфічне для кожного виду пилу значною мірою залежить від його дисперсного складу. Звичайно питоме зрошування коливається в межах 0,5-1,5 л/м<sup>3</sup> викиду. Скрубери Вентурі забезпечують високу ефективність очищення аерозолів (96-98%) з середнім розміром частинок 1-2 мкм при початковій концентрації до 100 г/м<sup>3</sup>. Питома витрата води на зрошування при цьому складає 0,1-1,2 л/м<sup>3</sup>.

Розроблені 10 типорозмірів, розрахованих на продуктивність від 3000 до 500000 м<sup>3</sup>/год. Діаметр горловини труби Вентурі змінюється в них від 115 до 420 мм.

За гідродинамічними характеристиками труби Вентурі можна розділити на:

- високонапірні (застосовуються для тонкого очищення викиду від мікронного і субмікронного), характеризуються високим гідравлічним опором (до 20000-30000 Па), мають продуктивність 50000-500000 м<sup>3</sup>/год, в комплект входять 1 або 2 окремо встановлених уловлювача бризок;

- середньо- і високонапірні (використовуються, головним чином, для підготовки викидів перед іншими пиловловлюючими апаратами, для очищення аспіраційного повітря); гідравлічний опір не перевищує 3000-5000 Па, продуктивність – від 3000 до 50000 м<sup>3</sup>/год.

## Відділення гомогенних забруднюючих речовин

### Адсорбція

Адсорбція - концентрація речовин на поверхні розділу фаз або в об'ємі пір твердого тіла (капілярна конденсація).

Адсорбційне очищення найбільш ефективно при обробці великих об'ємів газів або рідин з малим вмістом домішок.

У процесі адсорбції беруть участь, як мінімум, два агенти: тіло, на поверхні або в об'ємі пір якого відбувається концентрація поглинальної речовини (адсорбент) і поглинальна речовина. Якщо воно знаходиться в газовій або рідкій об'ємній фазі, тобто в неадсорбованому стані - це адсорбтив, після адсорбції - це адсорбат.

По типу сил, що обумовлюють процеси, їх можна розділити на дві групи: фізичну і хімічну сорбції:

-фізична адсорбція викликається силами молекулярної взаємодії. Універсальними силами молекулярної взаємодії, що виявляються навіть при переважанні інших сил взаємодії, є дисперсійні сили, що викликаються упорядкуванням руху електронів в частинках, що зближуються: молекули будь-якого адсорбтиву мають властивості флуктуючих диполів, що викликають "миттєві" відхилення розподілу електронної густини від середнього розподілу. При зближенні молекул адсорбтиву з атомами або молекулами адсорбенту рух флуктуючих диполів набуває впорядкованого характеру, який обумовлює тяжіння між ними. Свою назву дисперсійні сили одержали через те, що викликають явище розсіювання світла. Дисперсійні сили не залежать від характеру розподілу електронної густини в молекулах адсорбенту і адсорбтиву, тому взаємодія, що викликається між ними, носить неспецифічний характер.

Молекули адсорбату, наближаючись з об'єму газу або рідини до поверхні адсорбенту, піддаються тяжінню з боку цієї поверхні. При зіткненні з нею тяжіння врівноважується відштовхуванням. Поверхня адсорбенту покривається тонким (адсорбційним) шаром молекул адсорбату.

При фізичній адсорбції молекули адсорбату зберігають свою індивідуальність. При постійній температурі фізична адсорбція збільшується із зростанням тиску газу або концентрації розчину. Із зростанням температури фізична адсорбція зменшується, оскільки із збільшенням енергії теплового руху все більша частина молекул адсорбату стає здатною подолати тяжіння до поверхні - відбувається десорбція. Фізична адсорбція зворотна, вона зменшується із зменшенням концентрації адсорбату; вона часто супроводжується капілярною конденсацією речовини в порах адсорбенту. В області капілярної конденсації фізична адсорбція необоротна.

-при хімічній сорбції (на відміну від фізичної) не зберігається індивідуальність адсорбенту і адсорбтиву. При зближенні з поверхнею в

молекулах адсорбтиву відбувається перерозподіл електронів з утворенням хімічного зв'язку.

Фізичну і хімічну сорбції можна розрізнити по теплоті адсорбції. Теплота фізичної адсорбції сумірна з теплотою конденсації речовин і не перевищує 5-20 (для простих молекул) і 40-80 (для великих молекул) кДж/моль. Теплота хемосорбції наближена до теплоти хімічної реакції і для 1 моля речовини досягає 400-500 кДж. Хемосорбція, як правило, протікає з невеликою швидкістю і може проходити при високих температурах, коли фізична сорбція вельми мала.

Хемосорбція - поглинання газів, пари або розчинених речовин, що супроводжується утворенням хімічних сполук. Швидкість хемосорбції зростає із зростанням температури, швидкість і кількість поглиненої речовини ростуть із зростанням концентрації поглинальної речовини. Процес відбувається за рахунок залишкових валентних, іонних або координаційних сил поверхні і протікає звичайно до моношару. На відміну від фізичної адсорбції, хемосорбція надзвичайно залежить від хімічного стану і чистоти поверхні адсорбенту. Реальна поверхня сорбенту неоднорідна, хемосорбованими молекулами зайнята лише частина поверхні - активні центри. Десорбція приводить до отримання нових, відмінних від сорбованих молекул за рахунок протікання каталітичних реакцій в сорбованому шарі або взаємодії хемосорбованих молекул з адсорбентом.

Вимірювана на досвіді величина адсорбції звичайно відноситься до одиниці маси адсорбенту (моль/г) і залежить не тільки від природи адсорбенту і адсорбату, концентрації адсорбату в об'ємі і температури, але і від величини площі поверхні адсорбенту.

Ефективність адсорбційних систем багато в чому визначається властивостями адсорбенту, який повинен:

- мати достатньо велику адсорбційну здатність, тобто поглинати значні кількості домішок,
- мати високу селективність,
- мати високу механічну міцність,
- добре регенеруватися,
- мати можливо меншу вартість.

#### Пориста структура адсорбентів.

Здібність до адсорбції мають тіла з розвиненою поверхнею. Для твердих тіл з великою питомою поверхнею розрізняють зовнішні і внутрішні поверхні. Чіткого розподілу між ними немає, але виступи і тріщини, висота і глибина яких менше, ніж ширина, утворюють зовнішню поверхню, а тріщини, пори і порожнини, глибина яких більше, ніж ширина, дають внутрішню поверхню. У більшості пористих тіл внутрішня поверхня на декілька порядків більше, ніж зовнішня і загальна поверхня твердих тіл є переважно внутрішньою.



Пористі тіла можуть утворюватися не тільки в результаті об'єднання первинних частинок (силікагель, оксиди заліза, алюмінію), але і в результаті видалення частини речовини початково твердого тіла, наприклад, нікель Ренея, який одержують вилуговуванням Ni-Al сплаву, контрольоване спалювання вуглецевих матеріалів, термічне розкладання карбонатів.

Мікропори мають розміри, сумірні з молекулами, що адсорбуються. Їх ефективні радіуси знаходяться в інтервалі від 0,5 до 1,0 нм. Верхньою межею приймають 1,5 нм. Сумарний об'єм мікропор промислових адсорбентів звичайно не перевищує  $0,5 \text{ см}^3/\text{г}$ . Адсорбція в них зводиться до заповнення простору молекулами, що адсорбуються. Поняття "питома поверхня" для мікропор не має геометричного сенсу.

Іноді найкрупніші мікропори - радіусом від 0,7 до 1,5 нм виділяють в окрему категорію - супермікропори.

Мезопори мають розміри багато більше розмірів сорбованих молекул. Вони лежать в інтервалі від 1,5 до 100 – 200 нм. Для цього випадку набуває фізичного значення поняття про поверхню розділу фаз, тобто про поверхню пір адсорбенту. Звичайно поверхню адсорбенту відносять до одиниці його маси і називають питомою поверхнею. На поверхні пір відбувається утворення послідовних адсорбційних шарів, що завершується заповненням цього різновиду пір.

Основними параметрами мезопір є питома поверхня, об'єм пір і розподіл його за розмірами пір. Питомі поверхні мезопір можуть полягати в інтервалі від 10 до  $400 \text{ м}^2/\text{г}$ . Мезопори є основними транспортними артеріями, по яких здійснюється підведення речовини до мікропір.

Макропори мають ефективні радіуси більше 100 - 200 нм, їх питома поверхня дуже мала - від 0,5 до  $2 \text{ м}^2/\text{г}$ , тому адсорбцією на їх поверхні практично можна нехтувати. Об'єм макропір у АУ складає від 0,2 до  $0,8 \text{ см}^3/\text{г}$ . Макропори виконують роль крупних транспортних артерій.

Пориста структура адсорбенту значною мірою визначає його питому витрату при адсорбції: мікропори не беруть участь в процесі при вилученні з викиду молекул, розміри яких перевищують розміри цих пір. При адсорбції невеликих молекул мікропори є основною частиною адсорбційного об'єму адсорбенту.

#### Основні види пористих адсорбентів.

Деякі дослідники класифікують адсорбенти на три групи:

-неполярні тверді речовини, на поверхні яких відбувається, в основному, фізична сорбція,

-полярні тверді речовини, на поверхні яких відбувається хімічна адсорбція без зміни структури молекул домішки і поверхні адсорбенту,

-речовини, на поверхні яких протікає чисто хімічна адсорбція і які десорбують молекули домішок після хімічної або каталітичної реакції.

Найпоширеніший неполярний адсорбент - активоване вугілля.

Активне вугілля - пористі промислові адсорбенти, що складаються, в основному, з вуглецю. Їх одержують з різних видів органічної сировини: твердого палива різного ступеня метаморфізму: торфу (СКТ), бурого і кам'яного вугілля (АГ, АР), антрациту і смоли (АРТ), дерева і продуктів його переробки (деревного вугілля, тирси, відходів паперового виробництва) (БАВ), відходів шкіряної промисловості, матеріалів тваринного походження, наприклад, кісток. Вугілля з високою механічною міцністю одержують зі шкаралупи кокосових і ін. горіхів і з кісточок плодів. АВ як промислові сорбенти мають ряд особливостей, залежних від характеру поверхні і пористої структури.

Характеристики деякого активного вугілля

Марка АВ	Розмір гранул	Насипна щільність, кг/м <sup>3</sup>
БАВ	1 – 5	350
СКТ	1 – 3,5	380 – 500
АГ	1 – 1,5	450
АР	1 – 5,5	550
АРТ	1 – 6	550 - 600

Поверхня АВ електронейтральна і адсорбція визначається дисперсійними силами взаємодії. Адсорбційна місткість і швидкість адсорбції визначаються вмістом мікропор в одиниці маси або об'єму гранул.

При виборі адсорбенту слід враховувати дві відмітні властивості АВ: гідрофобність і горючість.

Насичення АВ вологою - процес надзвичайно повільний: рівновага встановлюється протягом декількох місяців. Тому вологість середовища практично не впливає на ефективність витягання домішок з газової або рідкої фаз. АВ - єдиний гідрофобний тип промислових сорбентів.

Негативна особливість АВ - його горючість. На повітрі окислення вугілля починається при температурі вище 250°C. Відомі випадки пожеж на вуглеадсорбційних установках при нижчих температурах. Це пов'язано з утворенням пірофорних сполук заліза типу FeS і Fe<sub>2</sub>S<sub>3</sub> в результаті сірководневої корозії апаратури. Щоб зменшити пожежну безпечність до АВ при одержанні додають до 50% силікагелю, одержуючи силікарбон.

При поглинанні домішок на активному вугіллі ступінь сорбованості залежить від розмірів молекул адсорбата. Найважче сорбують молекули з коротким вуглецевим ланцюгом і полярні сполуки. Молекули з довгим вуглецевим ланцюгом, ароматичні сполуки, заміщені вуглеводні добре сорбують АВ. Молекули, найбільш важко сорбовані, легше руйнуються біологічно. Адсорбція компліментарна (взаємодоповнює) біологічній обробці.

За ступенем сорбованості забруднюючі речовини підрозділяються на чотири групи:

-1 група (оцтова кислота, спирт, бензол, толуол, етилацетат) має хорошу сорбованість: одиниця маси адсорбенту поглинає речовини до 50% від маси вугілля,

-2 група (ацетон, акролеїн, хлор, сірководень, органічні розчинники і ін.) задовільно сорбовані: 10-25% від маси вугілля,

-3 група (ацетальдегід, формальдегід, пропан, бутан, аміни і ін.) – слабо сорбовані,

-4 група (оксиди вуглецю, етилен і ін.) низько сорбовані.

Останнім часом в промисловості застосовують вуглецеві адсорбенти нового типу: АВ з полімерних матеріалів і активовані вуглецеві волокна.

АВ, одержувані з полімерних волокон характеризуються розвиненою системою мікропор, регулярнішою структурою, що забезпечує поліпшення стійкісних характеристик і високою адсорбційною активністю при низькому вмісті домішок в газах, що очищаються.

Активовані вуглецеві волокна виготовляють з синтетичних волокон з різною формою кінцевого матеріалу (путанка, неткані вироби, повсть, тканина і ін.), що дає можливість використання різного апаратурного оформлення процесу очищення. Волоконні вуглецеві сорбенти мають високу термохімічну стійкість, хороші сорбційні властивості, через малі діаметри волокон ( $0,6-1,0 \cdot 10^{-5}$  м) характеризуються підвищеними швидкостями адсорбційно-десорбційних процесів, крім того їх можна просочувати розчинами хімічних реагентів або розчинами речовин, діючих як каталізатори безперервного розкладання забруднюючих речовин.

Силікагелі - один з найпоширеніших в промисловості адсорбентів, використовується для поглинання полярних речовин. Силікагель одержують на основі діоксиду кремнію по механізму поліконденсації при осадженні кремнезему з силікатів лужних металів мінеральними кислотами. Одержують гідратовані аморфні кремнеземи  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , реакційноспроможні сполуки змінного складу. Поліконденсація веде до формування структурної сітки сфероподібних частинок колоїдних розмірів, що зберігаються при висушуванні гідрогеля кремневої кислоти і створюючих жорсткий кремнекисневий каркас. Основні переваги силікагелів:

-низька температура, що вимагається при регенерації ( $110 - 200^\circ\text{C}$ ), через це нижчі енерговитрати при регенерації;

-можливість синтезу широкого інтервалу заданих структурних характеристик при використанні простих технологічних прийомів;

-низька собівартість при великотоннажному виробництві;

-висока механічна міцність до стирання і роздавлювання.

-вогнебезпечність.

Недолік – руйнуються краплинною вологою, що необхідно враховувати в системах газоочистки.

Випускають силікагель у вигляді кульок, пігулок або шматочків неправильної форми. Розміри зерен змінюються від 0,1 до 7,0 мм. За характером пористої структури силікагелі класифікують на крупно-, середньо- і дрібнопористі, до яких відносять матеріали з середніми розмірами пір, що дорівнюють відповідно  $5 \cdot 10^{-9}$ ,  $(5-1,5) \cdot 10^{-9}$  і  $(1,5-1,0) \cdot 10^{-9}$  м. За розміром зерен виділяють 4 класи силікагелів: КСК має розміри 7,0-2,7 мм, КСС – 3,5-1,5 мм.

Силікагелі випускають декількох марок:

Марка	Питома поверхня, м <sup>2</sup> /г
КСК-крупний силікагель крупнопористий	300-450
МСК-дрібний силікагель крупнопористий	282-288
КСМ-крупний силікагель дрібнопористий	400-750
МСМ-дрібний силікагель дрібнопористий	500-650

Активний оксид алюмінію (активний оксид  $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ , n змінюється від 0 до 0,6) одержують прожарюванням гідроксидів алюмінію, застосовують:

- для висушування газів;
- для очищення масел, особливо трансформаторних;
- для очищення газових і рідинних потоків від сполук, що містять полярні органічні молекули і фтор-іони, особливо, для очищення вод з підвищеним вмістом фтору, уловлювання пари HF з газів суперфосфатних і електролізних виробництв.

На відміну від силікагелів активний оксид алюмінію стійкий до дії краплинної вологи.

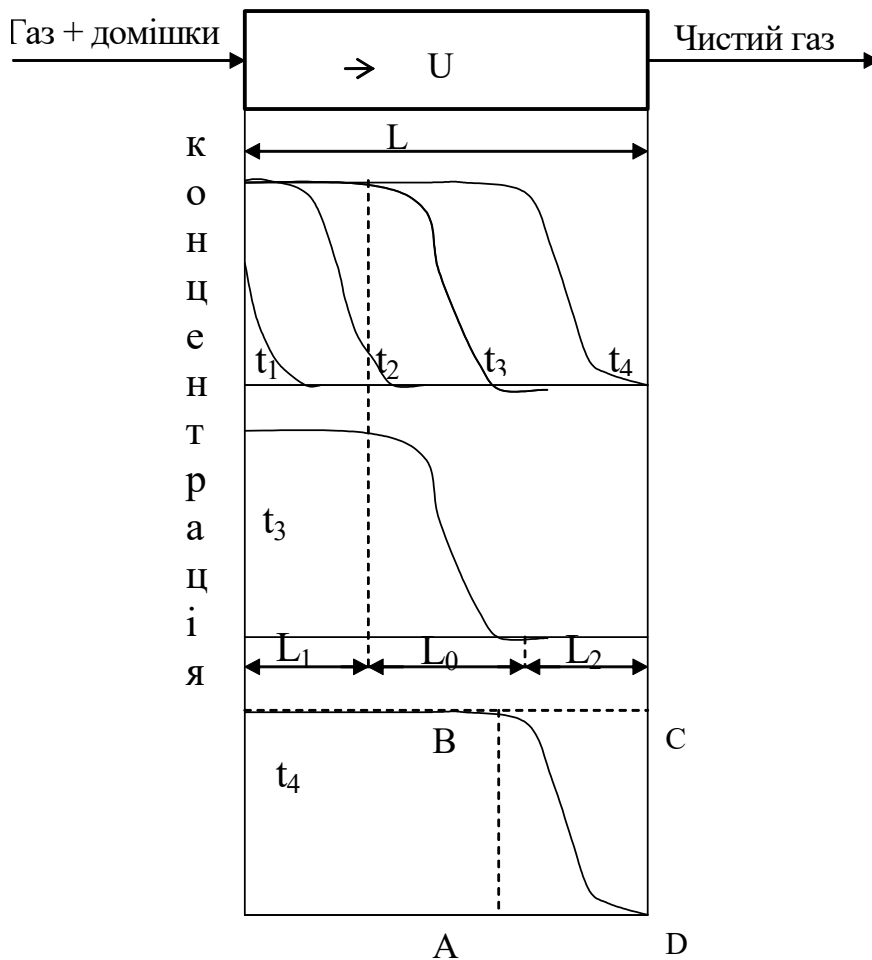
Цеоліти - алюмосилікати, що містять оксиди лужних і лужноземельних металів, - відрізняються суворо регулярною структурою пір, розміри яких сумірні з розмірами молекул, що через велику селективну здатність визначило іншу назву – «молекулярні сита». Загальна хімічна формула цеолітів  $M_{2/n}O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$  (M - катіон металу, n – його валентність). Вони мають найбільшу адсорбційну здатність по парах полярних сполук і речовин з подвійними зв'язками в молекулі. Одержують їх синтетичним шляхом або видобувають при розробці природних родовищ.

#### Динаміка адсорбції.

Динаміка сорбційних процесів розглядає просторово-часові розподіли компонентів між фазами системи (одна з яких - тверда), що виникають при переміщенні цих фаз відносно одне одного.

Процеси адсорбції екзотермічні, зворотні процеси (десорбція) вимагають підведення тепла.

Якщо концентрація адсорбату до початку процесу дорівнює нулю, концентрація адсорбтиву у вхідному потоці постійна. Введемо потік в адсорбер і будемо спостерігати за зміною концентрації в обох фазах. У перший момент часу в усіх перетинах шарів адсорбенту, окрім лобового, концентрація адсорбату дорівнює нулю. Адсорбент у лобовому шарі починає поглинати адсорбтив, концентрація якого в "елементарній" порції газу, що ввійшла, зменшується. Частково виснажена "елементарна" порція адсорбтиву разом з потоком газу поступає в наступний "елементарний" об'єм шару. У ньому теж іде поглинання речовини. Далі до сорбційного процесу залучаються третій, четвертий і т.д. "елементарні" об'єми.



В період часу  $t_1$  кількість адсорбтиву, що надійшов, ще недостатня для насичення лобового шару адсорбенту і розподіл адсорбату в шарі характеризується кривою  $t_1$ . При часі  $t_2 > t_1$  лобовий шар адсорбенту насичується адсорбатом до рівноважного стану, що характеризується рівноважною адсорбційною здатністю ( $a_p$ ).

Розподіл концентрацій в будь-якій з фаз, досягнутий до часу  $t_2$ , називається фронтом сорбції. Після цього моменту крива розподілу адсорбату переміщається з постійною швидкістю  $U$ , що визначається з рівняння

$$U = w \cdot c / a_p,$$

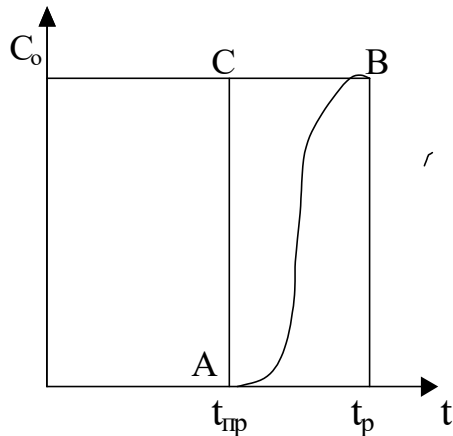
де  $w$  - швидкість газового потоку, см/с;

$c$  - концентрація адсорбтиву в газі, моль/см<sup>3</sup> газу,

$a_p$  - рівноважна адсорбційна здатність, моль/см<sup>3</sup> адсорбенту.

У період, що відповідає часу  $t_3$ , шар адсорбенту можна розділити на три зони: повністю відпрацьований шар  $L_1$ , працюючий шар  $L_0$  і шар  $L_2$ , що ще не вступив в роботу. У момент часу  $t_4$  крива розподілу переміщається в кінцевий

шар адсорбенту. З цієї миті, моменту "проскакування", в потоці газу, що виходить, з'являється і починає прогресивно зростати концентрація витягуваної речовини:



Вихідна крива при видаленні домішки з потоку газу в нерухомому шарі адсорбенту

$$t_4 = t_{пр},$$

де  $t_{пр}$  - момент "проскакування", час захисної дії шару адсорбенту.

Динамічна адсорбційна здатність ( $a_d$ ) шару адсорбенту характеризує кількість речовини, поглиненої до моменту "проскакування" і віднесене до маси завантаження всього адсорбера.

Між часом захисної дії шару і довжиною адсорбера існує залежність:

$$t_{пр} = k \cdot L - t_0,$$

де  $k$  - коефіцієнт захисної дії, що показує, який час шар завтовшки 1 см адсорбенту в умовах стаціонарного режиму затримує поглинальну речовину,

$t_0$  - втрата часу захисної дії, пов'язана з початковим періодом формування кривої розподілу адсорбату.

Коефіцієнт захисної дії є величина, зворотна швидкості руху сорбційної хвилі:

$$k = 1/U.$$

#### Способи проведення адсорбції.

Конструктивно адсорбери виконуються у вигляді вертикальних, горизонтальних або кільцевих ємностей, заповнених адсорбентом, через який фільтрується потік газу, що очищається. Вертикальні адсорбери використовують при невеликих витратах викиду, горизонтальні і кільцеві мають високу продуктивність, що досягає десятків і сотень тисяч  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Фільтрація відбувається через нерухомий (адсорбери періодичної дії) або рухомий шар адсорбенту. Найбільш поширені адсорбери періодичної дії. Такі установки конструктивно прості, але мають низькі допустимі швидкості газового потоку, тому громіздкі і металоємні. Відпрацьований сорбент, що втратив активність, періодично регенерують або замінюють. Істотний недолік таких адсорберів – великі енерговитрати, пов'язані з подоланням гідравлічного опору шару адсорбенту.

Рух адсорбенту під дією сил тяжіння або у висхідному потоці газу, що очищується, забезпечують безперервність роботи установки, що дозволяє повніше використати адсорбційну здатність сорбенту, спростити умови

десорбції і експлуатації устаткування. Недолік – значні втрати адсорбенту за рахунок стирання частинок в результаті зіткнень і ударів об стінки апарату.

#### Регенерація відпрацьованих адсорбентів

Необхідність періодичної регенерації зумовлює циклічність адсорбційних процесів. На проведення десорбції доводиться від 40 до 70% загальних витрат по газоочистці. Ефективність адсорбційного очищення газів визначається з урахуванням способів відновлення сорбційної активності.

Існує декілька способів проведення десорбції:

- підвищення температури (в основному). Цей спосіб здійснюють, нагріваючи відпрацьований (насичений) адсорбент до певної температури, забезпечуючи прийнятну інтенсивність процесу, прямим контактом з потоком водяної пари, гарячого повітря або інертного газу; або підводячи тепло через стінку з подачею в апарат деякої кількості віддугтевого агента (зазвичай інертного газу). При 100-200°C регенеруються АВ, силікагелі, активний оксид алюмінію. При 200-400°C регенеруються цеоліти.

- витіснення адсорбату (витіснювальна або холодна десорбція) речовиною, що краще сорбує, засновано на різній сорбованості цільового компонента і речовини, використовуваної як витіснювач (десорбенту). Для десорбції органічних речовин можна використовувати CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, деякі органічні речовини, здатні забезпечити ефективне витіснення цільового компонента і відносну простоту подальшої їх десорбції з адсорбенту.

- десорбція зниженням тиску може бути застосована в 2-х варіантах: скиданням тиску після проведення процесу адсорбції при підвищеному тиску до нормального або створенням розрідження після проведення адсорбції при нормальному тиску.

#### Захист атмосфери від забруднень методом адсорбції

Адсорбційний метод дозволяє провести глибоке очищення технологічних і промислових газів, що відходять, які містять різноманітні шкідливі речовини. Якщо правильно вибрані технологічний регламент, схема і апаратура процесу, домішок може бути видалений адсорбційним методом практично повністю. Це дає можливість забезпечити концентрацію домішків в повітряному середовищі значно нижче ГДК.

#### Рекуперація розчинників.

В установках рекуперації здійснюють уловлювання і повернення в технологічний процес розчинників з виробничих або вентиляційних газів. Втрати розчинників і їх викиди в атмосферу відбуваються як при зберіганні, так і при використанні в технологічних процесах і оцінюються зараз тисячами тонн на рік. Концентрація розчинника в газах, що відходять, найчастіше низька (декілька грамів в 1м<sup>3</sup>). Як адсорбент застосовують тільки АВ через його

гідрофобність: при відносній вологості до 50% волога практично не впливає на сорбованість пари органічних розчинників.

Окупність (рентабельність) адсорбційних установок залежить від концентрації розчинника у викиді.

Ступінь витягання розчинника на установках рекуперації звичайно складає 95 – 99%, а залишковий вміст розчинника в газі, що відходить з адсорбера, не перевищує 0,5 г/м<sup>3</sup>.

Нижні пороги рентабельності (по концентрації розчинника у викиді, С) адсорбційних установок з нерухомим шаром вугілля:

Розчинник	С, г/м <sup>3</sup>	Розчинник	С, г/м <sup>3</sup>
Бутилацетат	1,5	Ксилол, метилацетат, етилацетат	2,1
Трихлоретилен, етанол	1,8	Ацетон	3,0
Бензин, бензол, метиленхлорид, толуол	2,0	Тетрахлорвуглець	4,5
		Сірковуглець	6,0

Окупність установок рекуперації оцінюють в 1-2 роки. Експлуатаційні витрати залежать від концентрації розчинника в повітрі. Витрата енергії обернено пропорційна вмісту розчинника, витрата пари і води змінюються у меншій мірі. При відборі пари розчинників з робочих місць і проектуванні системи вентиляції слід прагнути, щоб концентрація адсорбтиву в газі була по можливості максимальною, але менше 0,5 від нижньої межі вибуховості (НМВ):

Компонент	Нижня межа		Верхня межа	
	%(об.)	г/м <sup>3</sup>	%(об.)	г/м <sup>3</sup>
амілові спирти	1,2	44	-	-
аміак	19,0	106	28,0	198
ацетилен	2,4	26	78,0	844
ацетон	3,0	68	10,8	247
бензол	1,4	45	6,7	217
водень	4,0	8	75,0	62
ксилол	1,1	48	7,0	309
метан	5,2	35	14,0	93
метиловий спирт	6,7	89	36,5	486
вуглець	12,5	145	74,2	863
пропан	2,1	38	9,1	167
сірковуглець	1,3	41	44,5	1408
сірководень	4,3	61	45,5	645
толуол	1,5	57	-	-
оцтова кислота	5,4	135	-	-
етиловий спирт	4,3	82	18,9	362
етиловий ефір	1,9	58	48,5	1494



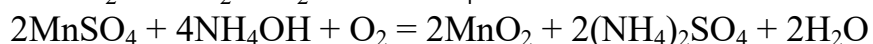
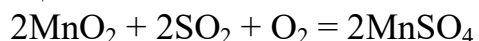
### Очищення газів від оксидів азоту.

У промисловій практиці адсорбція  $\text{NO}_x$  вельми обмежена. Достатньо ефективними поглиначами  $\text{NO}_x$  є АВ, але при їх контакті з оксидами азоту можливе значне розігрівання, що приводить до спалаху вугілля і навіть до вибухів. Разом з цим АВ характеризується низькою механічною міцністю і відновними властивостями, що переводять поглинений  $\text{NO}_2$  в слабосорбований  $\text{NO}$ .

Адсорбційна здатність силікагелів по  $\text{NO}_x$  декілька нижча, ніж АВ, але вони позбавлені недоліків АВ. Використанням силікагелів досягається сорбція  $\text{NO}_x$ , що досягає залишкових концентрацій 0,005%. Але за економічними міркуваннями процес у промисловості не реалізований.

### Очищення газів від діоксиду сірки.

Очищення газів від діоксиду сірки може бути здійснене технологічними способами – введенням в зону горіння твердих хемосорбентів (вапняк, доломіт, вапно). З цією ж метою можуть використовуватися оксиди деяких металів. З точки зору прийнятної швидкості поглинання найбільш перспективні оксиди Al, Bi, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sn. Практично реалізований оксидно-марганцевий спосіб (метод фірми «Міцубіші»). За цим методом гарячі димові гази обробляють порошком оксиду марганцю. У присутності кисню утворюється сульфат марганцю, який обробляють водним розчином аміаку для регенерації оксиду марганцю.



При вмісті  $\text{SO}_2$  у викиді 0,15об.% забезпечується 90% його витягання.

Для уловлювання  $\text{SO}_2$ , в основному, застосовують вуглецеві пористі речовини. Ефективність очищення 90-95%.

Якщо уловлювання проводити з безкисневого потоку, поглинання відбувається за законами фізичної сорбції, і при десорбції активність адсорбенту повністю відновлюється. Проте реальні гази в переважній більшості - кисеньвмісні.

Вуглецеві адсорбенти є каталізаторами перетворення  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$ , який у присутності води утворює сірчану кислоту. Концентрація кислоти, що утворилася, залежить від умов проведення процесу і вогкості газу, що очищається. Таким чином, адсорбат містить: фізично сорбований  $\text{SO}_2$ , що зворотно видаляється з твердої фази вакуумуванням або продуванням газу при температурі десорбції; сорбовану сірчану кислоту; сірчисті сполуки, що міцно пов'язані з вуглецем, видаляються тільки обробкою пероксидом водню. Ефективність очищення 90-95%. До таких методів відносяться процес Рейнфлюот (ФРН), Хітачі (Японія), Вествако (США). Адсорбенти ноу-хау, достатньо дефіцитні і дорогі. При регенерації поглиначів одержують або газ, що містить 40%  $\text{SO}_2$ , або сірчану кислоту невисокої концентрації.

У якості сорбентів для SO<sub>2</sub> ефективні цеоліти, зокрема кліноптилоліт- і морденітвмісні породи. Вони здатні працювати при високих температурах і при низькому вмісті газу. Але не вирішене питання їх регенерації.

Широкому впровадженню адсорбційних методів очищення газів від SO<sub>2</sub> перешкоджають значні витрати на апаратуру з дорогих корозійно-стійких матеріалів і значні витрати енергії на регенерацію сорбентів.

#### Очищення газів від галогенів і їх сполук

Очищення газу від сполук фтору. Концентрація сполук фтору в газах, що відходять, коливається в широких межах: від 30-200 мг/м<sup>3</sup> при виробництві добрив до 200 г/м<sup>3</sup> при виробництві алюмінію. Найдоступнішими твердими хемосорбентами є вапняк, алюмогелі, фторид натрію. На поверхні використовуваного вапняку утворюється розсипчастий шар CaF<sub>2</sub>. Його руйнують, відновлюючи свіжу поверхню, що не прореагувала, і повертають у процес. При сорбції фтористого водню одержують 80-95% CaF<sub>2</sub> – флюорит – товарний продукт. Обробка газу з концентрацією HF 0,6 об.% забезпечує очищення на 95%.

Для поглинання тетрафториду кремнію використовують NaF·HF.

Очищення від хлору і його сполук. Як тверді поглиначі використовують хлороксид заліза, хлорид Cu(I), порошки негашеного вапна, вапняк, оксид магнію.

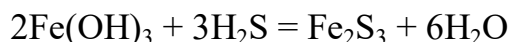
З промислових відходів можуть використовуватися різні речовини лужної природи: доменний і сталеплавильні шлаки в дозах 20-40 г/м<sup>3</sup>.

При поглинанні сухого HCl добре зарекомендували себе природні цеоліти. Повна десорбція HCl йде при 350°C.

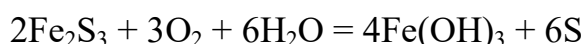
Багато традиційних сорбентів характеризуються низькою активністю по HCl при його малих концентраціях у викиді і поганою селективністю. Значні витрати на регенерацію поглиначів, висока вартість і дефіцитність деяких з сорбентів перешкоджають впровадженню твердофазних методів очищення.

#### Очищення від сірководню

Гази, що звичайно відходять, характеризуються низьким його вмістом, але перевищуючим ГДК. Найглибше очищення від H<sub>2</sub>S забезпечують адсорбційні методи з використанням гідроксиду заліза. При цьому утворюється його сульфід:



Присутній кисень окислює сульфідну сірку до елементарної з утворенням гідроксиду заліза



При використанні АВ можливий спалах шару АВ через високу екзотермічність процесу адсорбції і розігрівання шару вугілля. Тому застосування АВ обмежено концентрацією H<sub>2</sub>S до 5 г/м<sup>3</sup>.

Ефективним сорбентом  $H_2S$  є цеоліти, але за наявності в газах, що очищаються, кисню вони стають каталізаторами утворення елементарної сірки, яка дезактивує сорбент.

Витягання металів з газів, що відходять.

Рекуперація семиоксиду ренію проводиться цеолітами з газів, що відходять, у мідних і мідно-молібденових виробництвах. Водне вилуговування насичених ренієм цеолітів протягом 2-3 годин приводить до повного переходу  $Re_2O_7$  в розчин, з якого цінний компонент витягують екстракцією, іонним обміном або ін. методами. Процес рекуперації ренію з газів, що відходять, може бути здійснений в різних варіантах: у нерухомому, рухомому або псевдозрідженому шарі адсорбенту.

Захист атмосфери від ртуті адсорбційними методами застосовується при необхідності глибокої демеркурізації. Очищення полягає в пропусканні газової суміші через адсорбційну колонку з АВ, в якій відбувається виборча адсорбція ртуті. Вигідно очищати вологі гази, що містять оксиди сірки, оскільки  $H_2SO_4$ , що утворюється, забезпечує ефективну демеркурізацію за рахунок утворення  $HgSO_4$ . Залишкова концентрація Hg в таких умовах досягає  $0,0075 \text{ мг/м}^3$ . Вакуумна десорбція при  $450^\circ\text{C}$  протягом 1 год. забезпечує відновлення 97%-ої адсорбційної здатності АВ.

### Абсорбція.

Абсорбція – поглинання газу або рідини об'ємом рідини. Очищення газових викидів методом абсорбції полягає в розділенні газоповітряної суміші шляхом поглинання одного або декількох газових компонентів (абсорбатів) цієї суміші рідким поглиначем (абсорбентом) з утворенням розчину. Масоперенос з газової суміші в рідину здійснюється за допомогою дифузії. Процес протікає тим швидше, чим більше поверхня розділу фаз, турбулентність потоків і коефіцієнт дифузії, тобто важлива організація контакту газового потоку з рідиною і вибір поглинаючої рідкої фази (абсорбенту). Перенесення речовини між двома фазами є нерівноважним станом, тобто концентрація відокремлюваного компоненту в газовій фазі вища, ніж в рідкій. Для відділення необхідного компоненту газова (рідка) фаза приводиться в контакт з абсорбентом. Поглинальна речовина переміщується з газу в рідину у напрямі градієнта концентрації.

На швидкість абсорбції впливає температура і тиск. Із зростанням тиску і зниженням температури швидкість абсорбції збільшується. При зміні умов (наприклад, зниженні тиску або збільшенні температури розчину, що сорбує) спостерігається процес зворотний абсорбції - десорбція (відбувається виділення газу з рідини). Можна здійснювати циклічний процес абсорбції-десорбції для концентрації і утилізації відокремлюваного компоненту.

Абсорбція як метод очищення газів характеризується утворенням значних об'ємів рідких відходів (шламів), які, як правило, підлягають подальшій переробці (регенерації), пов'язаній з десорбцією.

Розрізняють абсорбцію двох видів: *фізичну і хімічну*. При *фізичній абсорбції* розчинення газів не супроводжується хімічною реакцією, поглинання компонента з газової суміші відбувається за рахунок міжмолекулярних сил тяжіння до тих пір, поки його парціальний тиск в газовій фазі вищий за рівноважний тиск над розчином. При *хемосорбції* йде скріплення компонента в хімічну сполуку (напр., поглинання SO<sub>2</sub> лужними розчинами). При необоротній реакції рівноважний тиск компонента над розчином нікчемно малий, можливе його повне поглинання.

Ефективність процесу абсорбції характеризується *ступенем витягання компоненту*. Ступінь витягання, що досягається, виражається *коефіцієнтом витягання* - відношенням кількості поглиненого компонента до кількості, яка могла бути поглинена при якнайповнішому витяганні.

$$A = \frac{C}{C^*} = \frac{a - b}{a - a^*},$$

де  $C = a - b$  - кількість поглиненого компонента ( $a$  - кількість компонента, що поступає на очищення,  $b$  - кількість компонента, що залишився неабсорбованим в газовій суміші),

$C^* = a - a^*$  - максимально можливе поглинання компонента ( $a^*$  - мінімально можлива кількість неабсорбованого компонента).

Роботу абсорбуючої апаратури характеризують *коефіцієнтом насичення* - відношенням кількості фактично поглиненого компонента до кількості, яка могла бути поглинена при максимально можливому насиченні рідини, тобто коли концентрація рідини, що відходить, знаходиться в рівновазі з концентрацією поступаючого газу:

$$M = \frac{N}{N^*} = \frac{m - n}{m^* - n},$$

де  $N = m - n$  - зміна концентрації поглинаючої рідини ( $m$  - концентрація рідини, що відходить,  $n$  - концентрація поступаючої на абсорбцію рідини)

$N^* = m^* - n$  - максимально можлива зміна концентрації поглинаючої рідини ( $m^*$  = максимально можлива концентрація рідини, що відходить).

Абсорбент повинен задовольняти ряду вимог:

➤ мати достатньо високу поглинальну здатність по відношенню до витягнутого з суміші газів компонента. У зворотному випадку збільшується його кількість, ростуть витрати на десорбцію і перекачування розчину. Високу поглинальну здатність мають ті поглиначі, для яких тиск витягнутого

компоненту над його розчином при температурі абсорбції малий;

- легко регенеруватися при десорбції. Для цього тиск компоненту над розчином при температурі десорбції повинен бути великим. Інакше при десорбції витрачатиметься велика кількість пари або в регенованому поглиначі залишиться значна кількість не відігнутого компоненту;
- мати високу селективність по відношенню до витягуваного компоненту, тобто добре поглинаючи витягуваний компонент, не поглинати інших компонентів газової суміші або абсорбувати їх в незначних кількостях;
- невисоку летючість, тобто тиск пари самого поглинача при температурі абсорбції і десорбції повинен бути невеликим щоб уникнути втрат його з газом, що відходить, або з відігнаним компонентом;
- володіти достатніми кінетичними властивостями і термохімічною стійкістю, тобто бути стійким в процесі роботи: не піддаватися змінам (розкладанню, окисленню, осмоленню) в результаті яких він може стати непридатним для подальшого використання;
- не надавати корозійної дії на апаратуру;
- мати можливо нижчу вартість;
- мати доступність для промислового застосування.

Звичайно жоден поглинач не задовольняє одночасно всім перерахованим вимогам. Тому неможливо підібрати універсальний поглинач. Його вибирають для кожного конкретного випадку залежно від умов процесу, необхідного ступеня очищення, складу, температури, тиску газу і концентрації витягуваного компоненту.

Системи абсорбції можна розділити на системи, в яких як абсорбент використовується:

- вода і водні розчини, їх використовують для видалення з технологічних викидів аміаку, хлористого і фтористого водню, що є доцільним, оскільки розчинність цих газів у воді складає сотні грамів на 1 л води;
- малолетючі органічні речовини, наприклад, в'язкі масла для уловлювання ароматичних вуглеводнів з коксівного газу.

#### Приклади промислово використовуваних абсорбентів

Поглинальні компоненти	Абсорбенти
Оксиди сірки $\text{SO}_2$ , $\text{SO}_3$	$\text{H}_2\text{O}$ , водні розчини і суспензії: $\text{NaOH}$ , $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , $\text{NaHCO}_3$ , $\text{KOH}$ , $\text{K}_2\text{CO}_3$ , $\text{KHCO}_3$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{CaCO}_3$ , $\text{MgCO}_3$ , $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , $\text{BaCO}_3$ , $\text{NH}_4\text{HCO}_3$
Оксиди азоту $\text{N}_2\text{O}_3$ , $\text{NO}_2$ , $\text{N}_2\text{O}_5$	Водні розчини і суспензії: $\text{NaOH}$ , $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , $\text{NaHCO}_3$ , $\text{KOH}$ , $\text{K}_2\text{CO}_3$ , $\text{KHCO}_3$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{CaCO}_3$ , $\text{MgCO}_3$ , $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , $\text{BaCO}_3$ , $\text{NH}_4\text{HCO}_3$

Оксид азоту NO	Вода, водні розчини $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , $\text{NH}_4\text{OH}$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , $\text{NaOH}$ , $\text{KOH}$ , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ , $\text{ZnSO}_3$ , $\text{K}_2\text{CO}_3$ ; суспензії $\text{CaO}$ , $\text{MgO}$ , $\text{CaCO}_3$ , $\text{ZnO}$ , золи
Сірководень $\text{H}_2\text{S}$	Водний розчин $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_3\text{AsO}_4(\text{Na}_2\text{HAsO}_3)$ ; водний розчин $\text{AsO}_3 + \text{NH}_3 + (\text{NH}_4)_3\text{AsO}_3$ моноетаноламін ( $\text{H}_2\text{N}-\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$ ); $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , $\text{Ca}(\text{CN})_2$
Оксид вуглецю CO	Рідкий азот; мідноаміачні розчини $[\text{Cu}(\text{NH}_3)]_n$
Діоксид вуглецю $\text{CO}_2$	Водні розчини $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , $\text{K}_2\text{CO}_3$ , $\text{NaOH}$ , $\text{KOH}$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{NH}_4\text{OH}$ ; етаноламіни $\text{RNH}_2$ , $\text{R}(\text{NH}_2)_2$
Хлор $\text{Cl}_2$	Розчини $\text{NaOH}$ , $\text{KOH}$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , $\text{K}_2\text{CO}_3$ , $\text{MgCO}_3$ , $\text{CaCO}_3$ , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$
Хлористий водень HCl	Вода, розчини $\text{NaOH}$ , $\text{KOH}$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , $\text{K}_2\text{CO}_3$
Сполуки фтору $\text{F}_2$ , $\text{SiF}_4$	Вода, розчини $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , $\text{NaOH}$ , $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Абсорбцію здійснюють в абсорберах. По характеру поверхні зіткнення фаз абсорбери можна розділити на: *плівкові, барботажні і розпилюючі*.

У *плівкових* абсорберах газ стикається з рідиною, рухомою у вигляді тонкої плівки. Найбільш поширені насадочні абсорбери, що є колонами, завантаженими насадкою – твердими тілами різної форми, призначеними для збільшення поверхні стікаючої по них рідини. Для рівномірного розподілу зрошуючої рідини застосовують різні зрошувальні пристрої. Забруднений газ входить в нижню частину колони, а очищений покидає її через верхню частину, куди за допомогою розбризкувачів подають чистий абсорбент, а з нижньої частини колони відбирають відпрацьовану рідину (організація протитечії). Насадочні колони прості в устрої, відрізняються малим гідравлічним опором. У них досягається максимальна рушійна сила, оскільки газ, що виходить, з якнайменшою концентрацією забруднюючих речовин контактує зі свіжим абсорбентом. За наявності твердої фази насадка забивається, і колона виходить з ладу.

У *барботажних* абсорберах газ розподіляється в рідині у вигляді міхурів і струменів, на поверхні яких відбувається абсорбція. Найбільш поширені барботажні абсорбери з ковпачковими тарілками. Рідина на тарілці підтримується знизу тиском газу і перетікає або по переливних трубках, або через ті ж отвори, що і газ. Газ, що очищається, рухається вгору, барботуючи через шар рідини. При проходженні між зубцями ковпачків газ розбивається на безліч цівок і міхурів, забезпечуючи велику поверхню зіткнення. Барботажні абсорбери працюють ефективно, але складні конструктивно і мають досить високий гідравлічний опір.

У *розпилюючих* абсорберах рідина розподіляється в масі газу у вигляді дрібних крапель. Така абсорбція проходить протитечею: зверху колони розпилюється рідина, знизу подається газ на очищення. Швидкість газу в цьому випадку обмежена, оскільки з її збільшенням збільшується віднесення рідини у вигляді бризок.

При організації замкнутих газорідинних циклів велике практичне значення має вибір способів десорбції газових компонентів, тобто регенерації уловлених газових компонентів. Десорбований компонент виділяється з розчину в газову фазу в концентрованому стані, зручному для утилізації або знешкодження. Як десорбуючий агент застосовують інертний газ або водяну пару. Для інтенсифікації процесу знижують тиск або підводять тепло, широко поширена десорбція гострою парою або через гріючу стінку. На практиці використовуються комбіновані способи десорбції.

Методи абсорбції очищення підрозділяються за наступними ознаками:

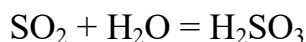
1. По компоненту, що абсорбується.
2. По типу вживаного абсорбенту.
3. По характеру процесу (з циркуляцією і без циркуляції газу).
4. По використанню абсорбенту (з його регенерацією і поверненням в цикл – циклічні і без його регенерації – не циклічні).
5. По використанню уловлюваних компонентів (з утилізацією і без утилізації, з рекуперацією і без рекуперації).
6. По типу рекуперованого компоненту.
7. По організації процесу (періодичні і безперервні).
8. По конструктивних особливостях апаратури абсорбції.

### Способи абсорбції очищення викидів

#### Очищення газів від SO<sub>2</sub>

Об'єми газів, що відходять і містять SO<sub>2</sub> великі, концентрація SO<sub>2</sub> в них низька, гази характеризуються високою температурою, значним вмістом пилу.

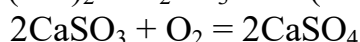
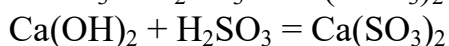
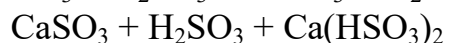
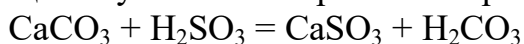
Для абсорбції можуть бути використані вода, водні розчини і суспензії солей лужних і лужноземельних металів. Абсорбція водою супроводжується реакцією



Розчинність SO<sub>2</sub> у воді мала, тому потрібна велика витрата води і апаратура з великими об'ємами. У Норвегії розроблений процес, в якому як поглинач використовують морську воду, що має слаболужну реакцію, за рахунок цього розчинність SO<sub>2</sub> зростає. Гази, що відходять, спочатку очищують від твердих часток в електрофільтрах або циклонах, потім охолоджують водою в скрубєрі Вентурі. Абсорбцію проводять в порожнистому скрубєрі, стічні води обробляють повітрям для переведу сульфїтних сполук в сульфатні, а потім скидають в море.

Вапнякові і вапняні методи технологічно прості, малі експлуатаційні витрати, сорбент дешевий і доступний, можливе очищення газу без попереднього охолодження і знепилювання.

Готують суспензію з розміром частинок 0,1мм і співвідношенням Т:Р = 1:10. Абсорбер зрошується цією суспензією. Протікають реакції:



Ступінь очищення досягає 85%, ступінь використання реагенту 50%. На електростанціях потужністю 1000 МВт щорічно утворюється в результаті очищення газів, що відходять, близько 780 т/рік на 1МВт шламів, які містять сульфід Са і до 65% води.  $\text{CaSO}_3$  дрібнокристалічний, гігроскопічний, здатний поглинати  $\text{O}_2$ . Таку суспензію згущують і поховують. У США розроблений спосіб змішування шламу із спеціальними добавками. Продукт стабільний, інертний і застосовується в дорожньому будівництві.

Окислення шламу до сульфату економічно вигідне навіть при похованні, оскільки досягається великий ступінь обезводнення з великими швидкостями.

Недоліки способу:

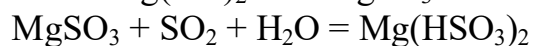
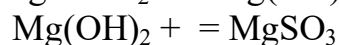
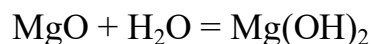
- заростання систем відкладеннями гіпсу,
- корозія устаткування,
- значний бризкоунос з абсорберів,
- утворюються осади.

Одним з перспективних і дешевих способів очищення димових газів від  $\text{SO}_2$  є використання лужних стічних вод підприємств. При цьому досягається високий ступінь очищення газів і одночасно нейтралізація СВ. Гази ТЕС, що відходять, очищаються СВ системи гідрозоловидалення в абсорбері з переливними тарілками. СВ мають рН 10-11,5, початковий вміст  $\text{SO}_2$  0,08-0,15%об. Ступінь очищення досягає 99%, рН СВ змінювалася до 7,0.

Рекупераційні методи очищення з регенерацією хемосорбентів

Магnezитовий метод: абсорбент - суспензія  $\text{MgO}$ , в процесі хемосорбції утворюються осади сульфїту  $\text{Mg}$ , які сушать, термічно розкладають на  $\text{MgO}$  і  $\text{SO}_2$ -що містить газ, який переробляють на  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Хімія процесу:





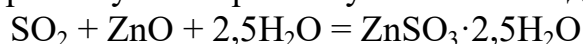
Достоїнства методу:

- можливість очищати гарячі гази без попереднього охолодження,
- одержання як продукту  $\text{H}_2\text{SO}_4$
- доступність і дешевизна сорбенту,
- висока ефективність очищення.

Недоліки:

- складність технологічної схеми,
- неповне розкладання  $\text{MgSO}_3$  при випаленні,
- значні втрати  $\text{MgO}$  при регенерації.

Цинковий метод використовує як сорбент суспензію оксиду цинку:



Утворена сіль нерозчинна у воді, її відділяють, сушать, обпалюють для отримання оксиду цинку і  $\text{SO}_2$ .

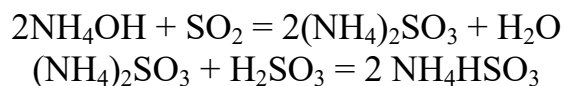
Достоїнство - можливість проводити реакцію при високій температурі.

Недолік - не вигідно економічно регенерувати цинк, його потрібно виводити з системи і замінювати свіжим оксидом.

Аміачні методи засновані на обробці суміші газів аміачною водою або водними розчинами сульфїт-бісульфїта амонію з подальшим виділенням продуктів реакції.

Достоїнства: висока ефективність процесу, доступність сорбенту, отримання товарних продуктів (сульфїту і бісульфїту)

Хімія процесу:



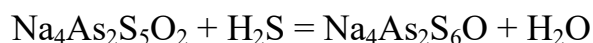
У амміачно-нециклічному методі продукт реакції є товарним продуктом. У циклічному методі продукт розкладають і використовують одержані  $\text{SO}_2$  і  $\text{NH}_3$ :  $\text{NH}_3$  – повертають на очищення, з  $\text{SO}_2$  одержують  $\text{H}_2\text{SO}_4$  або сірку.

Недолік методу - велика енергоємність.

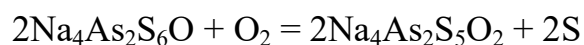
#### Очищення газів від сірководню

Сірководень міститься як домішок в природному газі, в коксохімічних газах, виділяється в целюлозно-паперовій промисловості при випаровуванні целюлозних лугів. Гази, що містять  $\text{H}_2\text{S}$  дуже корозійно активні і токсичні.

Миш'яковий метод. Розчин - абсорбент містить оксосульфомуш'яковонатрієву сіль:



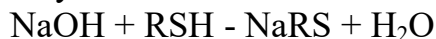
При продуванні відпрацьованого розчину повітрям виділяється елементарна сірка:



Ступінь абсорбції - до 99%.

### Очищення від сірковуглецю і меркаптанів (CS<sub>2</sub>, RSH)

Сірковуглець малоактивний при звичній температурі, тому його конвертують до H<sub>2</sub>S і потім ведуть очищення від H<sub>2</sub>S. Конверсія проходить на Fe-Cr каталізаторі при 400-500°C або на мідному при 600°C. Меркаптани сорбують лугами: нижчі меркаптани добре розчинні в лугах, але із збільшенням молярної маси розчинність знижується.



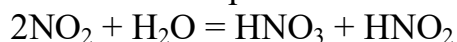
При регенерації проводять віддувку меркаптанів парою або нагрітим повітрям.

### Очищення газів від оксидів азоту

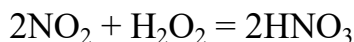
Азот утворює 5 оксидів. З газами, що відходять, викидаються найчастіше NO і NO<sub>2</sub>. Основна складність процесів абсорбції пов'язана з хімічною інертністю NO, оскільки це несолеутворюючий оксид.

Для абсорбції оксидів NO використовують воду, розчини лугів, селективні сорбенти.

Абсорбція водою - частина оксиду азоту при цьому виділяється в газову фазу, оскільки швидкість його окислення при низьких концентраціях мала.



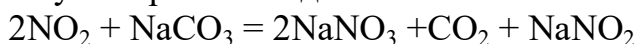
Для повної утилізації можливе використання H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (розбавлений розчин) з отриманням розбавлених розчинів азотної кислоти:



Основний чинник, що визначає економіку процесу, - витрата пероксиду водню (приблизно 6 кг на 1 т кислоти за добу).

Абсорбція лугами - застосовують різні розчини лугів і солей (що мають лужну реакцію):

якщо використовувати розчин соди



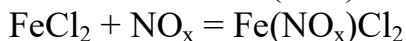
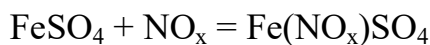
Можуть бути використані Mg(OH)<sub>2</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>, Ba(OH)<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>OH і їх солі.

Активність лужних розчинів зменшується в наступній послідовності:

KOH	NaOH	Ca(OH) <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Ba(OH) <sub>2</sub>	NaHCO <sub>3</sub>	KHCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub> ,
1	0,84	0,80	0,78	0,63	0,56	0,51	0,44	0,40
			BaCO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Mg(OH) <sub>2</sub>			
			0,40	0,39	0,35			

Активність визначається початковим рН розчину. Чим він вищий, тим вища активність.

Селективні сорбенти. За відсутності в газовій фазі кисню можуть бути використані розчини FeSO<sub>4</sub>, FeCl<sub>2</sub>, NaHCO<sub>3</sub>. Сполуки заліза утворюють комплексні сполуки:



При нагріванні до 95-100°C комплекси розпадаються і NO<sub>x</sub> виділяється в чистому вигляді. Відновлений розчин повертається у виробництво. Найбільш доступний і ефективний розчин FeSO<sub>4</sub>. Можуть бути використані травильні розчини. При температурі 20-25°C такий розчин може поглинати NO навіть при невеликих концентраціях. Межа розчинності NO відповідає співвідношенню  $NO_x / Fe^{+2} = 1 / 1$ .

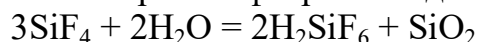
#### Метод одночасного очищення газів від SO<sub>2</sub> і NO.

Гази спалювання сірчастого палива, що відходять, можуть бути очищені комплексно при використанні NaOH і Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. При цьому шлам містить Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaNO<sub>3</sub>, NaNO<sub>2</sub>, а при абсорбції Ca(OH)<sub>2</sub> – CaSO<sub>4</sub>, Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Ступінь очищення складає 90% для SO<sub>2</sub> і 70-90% для NO<sub>x</sub>.

#### Очищення від галогенів та їх сполук

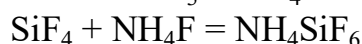
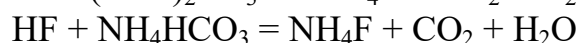
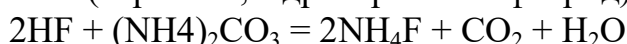
Фторвмісні сполуки утворюються при виробництві алюмінію і фосфорних добрив. Вони містять HF і SiF<sub>4</sub>. Для абсорбції можливе використання води, водних розчинів лугів, солей і деяких суспензій: (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>OH, NH<sub>4</sub>F, NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub>.

Абсорбція водою. HF і SiF<sub>4</sub> добре розчинні у воді. При цьому утворюються розчини плавикової і кремнійфтористоводневої кислот:

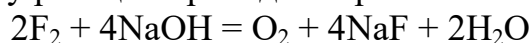


У промисловості при абсорбції SiF<sub>4</sub> звичайно одержують 10-20% розчин H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>.

Процес проводять в насадочних або тарільчастих колонах і скруберах Вентурі. Ступінь очищення газів досягає 90-95%. Для підвищення ступеня очищення проводять декілька його ступенів. Часто абсорбцію здійснюють розчинами амонійних солей (карбонат, гідрокарбонат і фторид):



Якщо в газах, що відходять, присутній F<sub>2</sub>, використовують розчин NaOH концентрацією не менше 2%, оскільки при цьому утворюється надзвичайно токсичний оксид F<sub>2</sub>O. Тому реакцію проводять при контакті не менше 1 хв.:



Одержану в результаті очищення газів кремнійфтористу кислоту переробляють з отриманням AlF<sub>3</sub>, криолітів (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>), кремнійфторидів, синтетичного CaF<sub>2</sub>.

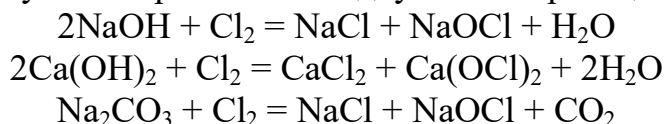
#### Очищення від хлору і його сполук.

Такі викиди характерні для багатьох виробництв - отримання хлору і лугів електролізом кухонної солі, переробки кольорових металів, отримання соляної

кислоти і хлорвмісних неорганічних і органічних сполук. Останнім часом джерелом таких викидів є установки спалювання хлорвмісних відходів.

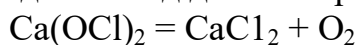
Для абсорбції використовують воду ( $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{HCl} + \text{HClO}$  – гіпохлоритна кислота), водні розчини лугів, водні суспензії.

При взаємодії з лужними розчинами відбуваються реакції:



Велике практичне значення мають розчин  $\text{NaOH}$  (100-150 г/л) і водна суспензія  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (100-110 г/л).

Утворені гіпохлорити можуть бути використані для знезараження стічних вод або термокаталітично розкладатися під дією гострої пари:



Процес можна проводити в абсорберах будь-якої конструкції. Ступінь очищення газів досягає 70-90%.

Достоїнства вапняного методу:

- невелика вартість і доступність реагенту,
- не потребує спеціального захисту від корозії.

Недолік:

- невисокий ступінь очищення,
- недостатній ступінь використання абсорбенту.

На деяких, підприємствах кольорової металургії як абсорбент використовують водні розчини  $\text{FeCl}_2$ . При цьому одержують  $\text{FeCl}_3$ , який є товарним продуктом.

$\text{HCl}$  добре розчинний у воді, тому просто поглинається водою з отриманням розчину соляної кислоти, Можна застосовувати лужні розчини.

Основний недолік поглинання водою - утворення туману соляної кислоти. Лужні розчини (луги або карбонати) дозволяють підвищити ефективність очищення і одночасно нейтралізувати стоки, що утворюються. Найдешевшим реагентом є вапняне молоко.

#### Очищення газів від оксиду вуглецю

Вуглець (С), що утворюється при неповному згоранні речовин, входить до складу газів, що виділяються при виплавці і переробці чорних і кольорових металів, вихлопних газів двигунів, при вибухових роботах.

Мідно-аміачне очищення в результаті якого утворюються комплексні сполуки:



Для забезпечення глибокого очищення процес ведуть при тиску 11,8 – 31 МПа і температурі розчину 0-20°C. Регенерацію розчину ведуть нагріванням його парою.

Абсорбція мідь-алюміній-хлоридними розчинами. Спосіб застосовують за наявності у викиді кисню і великих кількостей СО. Використовується розчин 20-50%  $\text{CuAlCl}_4$  і 80-50% толуолу. Йде виборча хемосорбція СО з утворенням  $\text{CuAlCl}_4 \cdot 2\text{CO}$ .

Інші гази не реагують з комплексом, але він руйнується водою, тому викид, що очищається, повинен бути ретельно осушений.

#### Термічне знешкодження газів

Метод заснований на здатності горючих токсичних компонентів окислюватися до менш токсичних за наявності кисню і підвищеної температури газової суміші. Цей метод застосовується, коли об'єми викиду великі, коли інші методи не є достатньо надійними, наприклад, при знищенні хвороботворних мікробів або запахів.

Методи термічного знешкодження у багатьох випадках мають деякі переваги перед методами адсорбції:

- відсутнє шламоутворення,
- очисні установки мають невеликі габарити,
- прості в обслуговуванні.

Недоліки :

- утворення оксидів азоту при високих температурах,
- велика витрата палива,
- характер продуктів реакції окислення: продукти спалювання газів, що містять Р, S і галогени, набагато токсичніші початкових газових викидів.

Розрізняють три схеми термічної нейтралізації газових викидів:

- пряме спалювання в полум'ї
- термічне окислення
- каталітичне спалювання

Пряме спалювання в полум'ї здійснюється при 800-900°C, але температура може досягати 1300°C Таким чином проводять знешкодження газів, що відходять, на нафтопромислах, нафтохімічних підприємствах, замість того, щоб уловлювати і використовувати цінні компоненти викидів; а також допалюють СО, що відходить від електродугових пічок. Застосування методу економічно виправдане лише у разі легкої окислюваності знешкоджуваних домішок. Якщо концентрація останніх достатньо велика і знаходиться в області займистості (існують нижня і верхня межі займистості), то після первинного підпалу реакційної суміші в системі протікатиме процес самоокислювання.

Нижню межу вибуховості визначають за формулою:

$$\text{НМВ} = \frac{100}{4,76(\text{N} - 1) + 1},$$

верхню межу вибуховості визначають за формулою:

$$VMB = \frac{400}{4,76N + 4},$$

де N – число атомів кисню, що витрачаються при повному окисленні молекули забруднюючої речовини.

Основні причини використання цього методу:

- універсальність відносно домішок будь-якого вигляду у викидах;
- неможливість повного знешкодження токсичних, патогенних і інфекційних компонентів викиду іншими методами;
- можливість повної автоматизації процесу;
- незначна виробнича площа, займана устаткуванням;
- можливість рекуперації тепла, що виділяється при горінні, в деяких випадках – утилізація очищених газів;
- відсутність шламового і реагентного господарств.

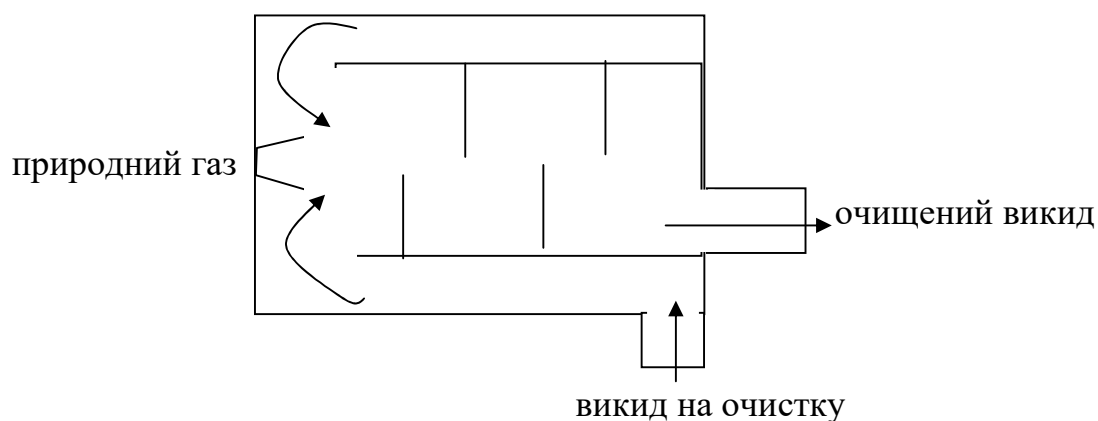
Недоліки:

- при високих температурах утворюються оксиди азоту;
- продукти спалювання викидів, що містять фосфор, сірку та/або галогени, набагато більш токсичні початкових викидів.

Термічне доокислення застосовують тоді, коли в потоці газів, що відходять, недостатня концентрація горючих домішок для підтримки реакції горіння. Цей спосіб вимагає використання додаткової кількості палива. При здійсненні цього методу очищення важливі:

- час перебування в установці (до повного окислення);
- початкова температура викиду;
- температура в зоні окислення;
- високий ступінь механічного перемішування.

Витрата додаткового палива 25-40 кг умовного палива на 1000 м<sup>3</sup> оброблюваних газів.



Переваги методу:

- невисока температура горіння, що дозволяє уникнути утворення оксидів азоту.

Каталітичні методи.

Каталіз – зміна швидкості реакції у присутності речовин (каталізаторів), що змінюють швидкість реакції, але не змінюючи свого стану в цій реакції.

Каталітичне знешкодження – це нейтралізація шкідливих речовин при їх взаємодії з компонентами того ж газового потоку або з добавками, що спеціально вводяться, яка відбувається під впливом каталізаторів при 300-400°C за 0,1-0,5 с. Це деструктивне очищення.

Основна перевага методу полягає у тому, що він може забезпечити безперервне знешкодження при великих об'ємних швидкостях газових потоків, при цьому досягається високий (99-100%) ступінь очищення при стабільній роботі.

Специфічність каталітичного очищення полягає в тому, що для здійснення каталітичного процесу необхідні незначні кількості каталізатора, розташованого так, щоб забезпечити максимальну поверхню контакту з газовим потоком, а також у тому, що реакція протікає при порівняно невисоких концентраціях забруднюючих речовин.

Каталізатори повинні мати такі властивості:

- активність як в окислювальному, так і у відновному середовищі;
- селективність;
- забезпечувати повне перетворення домішок при відносно невисоких температурах (200-500°C);
- високо розвинену поверхню;
- достатню механічну міцність;
- малу розпилюваність;
- малу зпикаємість;
- опірність до контактних отрут;
- відносну дешевизну;
- легкість регенерації.

Основні технологічні характеристики промислових каталізаторів:

- активність і селективність;
- стабільність і легкість регенерації;
- механічна міцність.

Активність каталізатора (A) характеризується інтенсивністю процесу на даному каталізаторі, що виражається кількістю продукту G, одержуваного за одиницю часу (t, год.)

з одиниці об'єму ( $v, \text{м}^3$ ) каталізатора

$$A = \frac{G}{v \cdot t}$$

або з одиниці маси ( $m, \text{г}$ ) каталізатора

$$A = \frac{G}{m \cdot t}$$

або з одиниці працюючої поверхні ( $s, \text{см}^2$ ) каталізатора

$$A = \frac{G}{s \cdot t}$$

Характеристикою активності каталізатора є і об'ємна швидкість каталітичного процесу, при якій забезпечується необхідний ступінь очищення. Об'ємна швидкість – це відношення витрати викиду ( $Q, \text{м}^3/\text{год.}$ ) до об'єму каталізатора ( $v, \text{м}^3$ ). Ступінь знешкодження 85-95% звичайно досягається при об'ємній швидкості від 2000 до 60000  $\text{год.}^{-1}$

Стабільність каталізатора полягає в його здатності зберігати активність і селективність в часі в умовах промислової експлуатації. Втрата стабільності пов'язана, як правило, з отруєннями каталізатора. По сталих в промисловості нормах нижня межа стабільності каталізаторів дорівнює 700-750 годинам.

Універсальних каталізаторів немає, їх підбирають відповідно до конкретних умов застосування, враховуючи, що каталітичні методи категорично не застосовні для очищення газів, що містять:

- висококиплячі органічні речовини;
- пил;
- високомолекулярні сполуки, які при неповному окисленні блокують активну поверхню каталізатора;
- каталітичні отрути (галогенвмісні, елементорганічні сполуки, сполуки заліза, свинцю, кремнію, миш'яку, фосфору, сірки).

Отруєння каталізатора може бути оборотним і необоротним. Каталізаторні отрути або скорочують термін служби каталізатора, або пригнічують його активність. Якщо отруєння відбулося через формування на поверхні каталізатора плівки, що перекриває доступ реагуючих речовин до поверхні каталізатора, можлива регенерація поверхні з відновленням каталітичних властивостей. Для регенерації каталізатора його обробляють киснем, повітрям, водяною парою при 400-500°C, причому вища температура регенерації залежить від термостійкості каталізатора. Для регенерації каталізаторів, необоротно отруєних отрутами, необхідно обробляти поверхню каталізатора реагентами, що видаляють каталізаторні отрути.

Відомо, що для окислювально-відновних реакцій, найчастіше вживаних при очищенні і знешкодженні токсикантів, найпоширенішими каталізаторами є благородні (Pt, Pd), перехідні метали (Ni, Fe, Co, Cu) і їх оксиди ( $\text{MnO}_2, \text{MoO}_3,$



CuO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Слід зазначити, що Pt і Pd, що є найактивнішими з відомих каталізаторів, крім високої вартості, володіють іншими негативними якостями – легким отруєнням каталізаторними отрутами і трудностю регенерації.

Виділяють такі типи каталізаторів:

➤ суцільнометалеві (метали платинової групи або неблагородні метали, нанесені на стрічки, сітки, спіралі або листи з неіржавіючої сталі). Вони мають деякі переваги перед іншими типами каталізаторів – набагато більш термостабільні, мають період експлуатації більше 1 року, зносостійкі, мають високі тривкісні характеристики, розвинену поверхню, їх регенерація вельми проста. Каталізаторна маса виконується звичайно у вигляді кульок, кілець, пластин або дроту, звитого в спіраль з ніхрому, нікелю з нанесеним на їх поверхню каталізатором (соті частки % від всієї каталізаторної маси).

➤ керамічні (платинові метали або оксиди неблагородних металів, нанесені на керамічну основу у вигляді стільників або грат). Вони більш прості і дешеві у виготовленні, не створюють перешкод на шляху газового потоку, мають малу насипну щільність, зберігають активність при знешкодженні запарошених потоків, але менш термостабільні. Найбільш активні серед них каталізатори, що містять платину і паладій;

➤ насипні (готуються у вигляді гранул або пігулок різної форми з Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з нанесеним шаром каталізатора або у вигляді зерен оксидів неблагородних металів). Високоактивні і термостійкі каталізатори. Але невисока механічна міцність, створення перешкод на шляху газового потоку, короткий період експлуатації – недоліки цього типу каталізаторів.

#### Каталітичне відновлення оксидів азоту

Як каталізатори використовуються метали платинової групи (паладій, рутеній, платина, родій) або дешевші і менш стабільніші в експлуатації склади, що містять нікель, хром, цинк, ванадій і інші елементи. Ефективність платинових каталізаторів при об'ємних швидкостях викиду  $(2-12) \cdot 10^4 \text{ год.}^{-1}$  дозволяють знизити концентрацію від 0,1 об.% до  $5 \cdot 10^{-4}$  об.%. Відновником може служити СО.

#### Каталітичне очищення від оксиду сірки

При обробці димових газів, очищених від золи-віднесення, на ванадієвому каталізаторі, одержують з SO<sub>2</sub> > SO<sub>3</sub>, який уловлюють водою з отриманням розчину сірчаної кислоти.

#### Каталітичне очищення від оксиду вуглецю

Найраціональніший спосіб – каталітичне окислення. Використовують, як каталізатори, Mn, Cu-Cr, метали платинової групи. При використанні каталізатора ШПК-2, що містить 0,2% платини на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ступінь очищення сягає 99%, при цьому проходять екзотермічні реакції. Утилізація енергії дозволяє

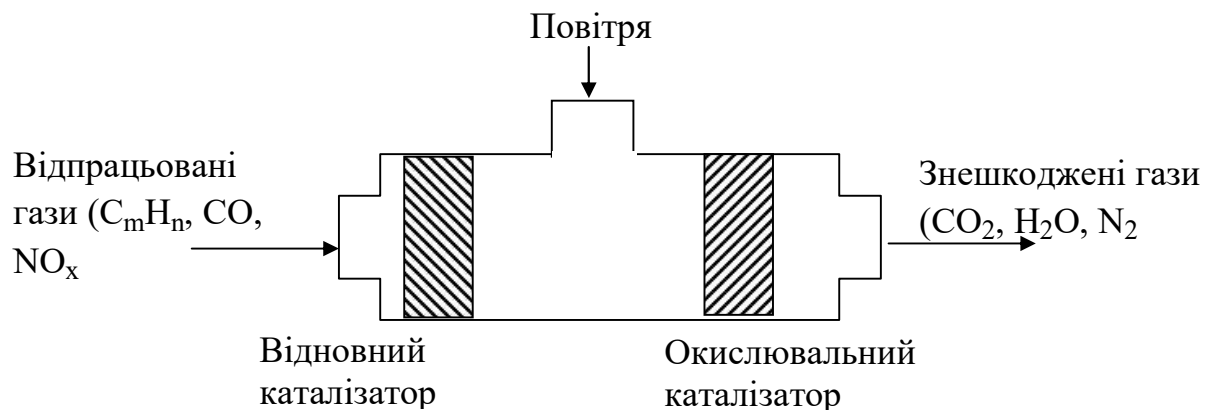
одержати перегріту до  $380^{\circ}\text{C}$  пару під тиском 4 МПа. При обробці  $60 \text{ тис. м}^3/\text{год}$ . газів, що відходять, виробляється  $30 \text{ т/год}$ . пари.

Каталізатори платинової групи більш стійкі до каталізаторних отрут. При знешкодженні газів аглофабрик, що відходять, каталізатори стійкі від 4 (Mn) до 120 (Cu-Cr) годин. Каталізатор з платини на  $\text{Al}_2\text{O}_3$  працює 6-12 місяців при ступені конверсії CO більше 70% при  $225^{\circ}\text{C}$  і швидкості потоку  $100 \text{ тис. м}^3/\text{год}$ .

Каталітичні методи застосовують не тільки для знешкодження промислових викидів, але і на транспорті для знешкодження відпрацьованих газів.

Нейтралізація продуктів неповного згорання палива досягається їх каталітичним доокисленням до  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ .

Нейтралізація оксидів азоту, що утворюються, вимагає каталітичного відновлення до  $\text{N}_2$ .



Тому каталітичне знешкодження відпрацьованих газів автомобілів роблять двоступінчастим: вихлопні газі поступають спочатку до відновного каталізатора. Після відновного каталізатора до відпрацьованих газів для створення окислювальної атмосфери подається повітря. На окислювальному каталізаторі відбувається доокислення CO і вуглеводнів.

До складу каталітичних нейтралізаторів входять: платина, паладій, цирконій, рутеній, цезій і інші рідкоземельні елементи. Найбільш ефективні каталізатори на основі благородних металів (платини і паладію). Платина – універсальний каталізатор, прискорюючий як реакції окислення, так і реакції відновлення. Монель-метал (Cu-Ni- сплав) також використовують як відновний каталізатор. Паладій, як правило, використовують для прискорення окислювальних реакцій. Як каталізатори відновних реакцій використовують також оксиди міді, нікелю, марганцю, ванадію, хрому і т.д. Кількість напиленого металу досягає 9г, робоча поверхня –  $15000 \text{ м}^2$ . У США щорічно в каталізаторному виробництві використовується близько 20 т платини і 8 т паладію. Досягається ступінь очищення 90%. Тривалість роботи каталізатора 80-90 тыс.км.

З 1993 р всі країни ЄЕС випускають автомобілі з нейтралізаторами, а уряд Німеччини виплачує власникам старих автомобілів безвідплатні субсидії у розмірі 100 марок на покупку і установку нейтралізаторів.

Запитання для перевірки отриманих знань:

1. Які методи зниження забруднення атмосфери відносяться до пасивних, до активних? Чому?
2. Які методи очищення відносяться до регенеративних, до деструктивних? Чому?
3. Принципова технологічна схема очищення викиду.
4. Залежність між витратами на захист атмосфери і збитком навколишньому середовищу.
5. Густина частинок як характеристика компоненту викиду.
6. Адгезійні властивості частинок як характеристика компоненту викиду.
7. Абразивні властивості частинок як характеристика компоненту викиду.
8. Електропровідність частинок як характеристика компоненту викиду.
9. Класифікація забруднюючих речовин, які можуть входити до складу викиду.
10. Класифікація методів очищення викидів.
11. Гідравлічний опір очисного апарату.
12. Характеристика сухих механічних методів очищення викидів від гетерогенних забруднень, достоїнства і недоліки.
13. Очищення викидів в сухих пиловловлювачах (пилоосадні камери).
14. Принцип роботи циклонів.
15. Характеристика мокрих механічних методів очищення викидів від гетерогенних забруднень, достоїнства і недоліки.
16. Очищення викидів в промивних камерах і порожнистих скруберах.
17. Очищення викидів в насадкових скруберах.
18. Очищення викидів в мокрих інерційних пиловловлювачах (скрубери Вентурі).
19. Очищення викидів в барботажних і пінних скруберах.
20. Принцип роботи промивних камер і порожнистих скруберів.
21. Принцип роботи насадкових скруберів.
22. Принцип роботи барботажних і пінних скруберів.
23. Відділення гетерогенних забруднюючих речовин фільтрацією.
24. Рукавні фільтри.
25. Принцип роботи фільтруючих очисних установок.
26. Принцип роботи електрофільтру.
27. Достоїнства і недоліки очищення викидів електрофільтрацією.

28. Класифікація пористих фільтруючих перегородок.
29. Класифікація фільтрів за конструкційними особливостями.
30. Сорбційні методи очищення (абсорбція).
31. Сорбційні методи очищення (адсорбція).
32. Фізична і хімічна сорбція забруднюючих речовин.
33. Способи проведення регенерації відпрацьованих адсорбентів.
34. Термічні методи очищення викидів.
35. Каталітичні методи очищення викидів.
36. Каталітичні отрути.
37. Області застосування термічних методів очищення викидів.

### Література

#### Основна література:

1. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешников Н.С. Техника защиты окружающей среды. – М.: Химия, 1989. –512с.
2. Оборудование, сооружения, основы проектирования химико-технологических процессов защиты биосферы от промышленных выбросов. – М.: Химия, 1985. –352с.

#### Додаткова література:

1. Чуянов Г.Г. Обезвоживание, пылеулавливание и охрана окружающей среды. – М.: - Недра, 19867, - 295с.
2. Балабеков О.С., Балтабаев Л.Ш. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты. – М.: Химия, 1991. – 371с.
3. Матрос А.Е. Каталитическое обезвреживание отходящих газов. М.: Химия, 1991. – 185с.
4. В.В.Глухов, Т.В.Лисочкина, Т.П.Некрасова. Экономические основы экологии. С-Пб., 1995. – 386с.
5. Ресурсосберегающие технологии, №24, 2003, С.3-52.
6. Инженерная экология, №5, 2000, С.22-30.
7. Научные и технические аспекты охраны окружающей среды, №5, 2001, С.24-43.