**Практична робота №1**

# **Тема: Абсорбційні методи очищення газів від парів та газоподібних забруднень. Типи абсорбційного обладнання**

**Мета:** **Вивчити принципи роботи та конструктивні особливості різних типів абсорберів (трубчастих плівкових, насадкових, тарілчастих, з рухомою насадкою). Ознайомитися з промисловим застосуванням абсорбційних методів для вловлювання діоксиду вуглецю та інших забруднюючих речовин. Набути навичок аналізу переваг і недоліків різних типів абсорбційного обладнання для конкретних умов газоочищення.**

**Теоретичні відомості**

Очищення газів від хімічних забрудюючих речовин найчастіше здійснюють абсорбційними, адсорбційними та каталітичними методами.

Абсорбція є одним з найважливіших процесів у хімічній технології та промисловому газоочищенні. Цей метод базується на здатності рідин поглинати гази або пари, які контактують з їх поверхнею. Процес абсорбції широко застосовується для очищення промислових викидів, виділення цінних компонентів з газових сумішей, а також у виробництві різних хімічних продуктів.

Коли газ контактує з рідиною, молекули газу починають розчинятися в ній. Цей процес продовжується доти, доки не встановиться рівновага між кількістю молекул, що переходять з газу в рідину, і тих, що повертаються назад. Стан рівноваги описується законом Генрі, який встановлює пряму пропорційність між парціальним тиском газу над розчином і його концентрацією в рідині. Константа цієї пропорційності називається константою Генрі і залежить від природи газу, властивостей рідини та температури процесу.

Важливо розуміти, що розчинність газів у рідинах зменшується зі зростанням температури. Це фізичне явище пояснює, чому холодна вода краще поглинає гази, ніж тепла. Саме тому в промислових абсорберах прагнуть підтримувати якомога нижчу температуру рідини-поглинача. Крім температури, на розчинність впливає тиск: підвищення тиску збільшує кількість газу, яка може розчинитися в рідині, що також використовується в промислових установках.

Рушійною силою процесу абсорбції є різниця між фактичною концентрацією газу в рідині і рівноважною концентрацією, яка відповідає його парціальному тиску в газовій фазі. Чим більша ця різниця, тим інтенсивніше відбувається поглинання. Для збільшення швидкості процесу необхідно збільшувати площу контакту між фазами, інтенсивність перемішування і підтримувати максимальну рушійну силу по всій висоті апарата.

На практиці це досягається шляхом використання різних контактних пристроїв: насадок, тарілок, розпилювальних форсунок. Важливо також забезпечити протиточний рух фаз, коли свіжа рідина контактує з газом, який вже частково очищений, а свіжий газ зустрічається з відпрацьованою рідиною. Така схема дозволяє підтримувати високу рушійну силу по всій висоті апарата і досягти високого ступеня очищення газу.

У промисловості використовується велика кількість різних систем газ-рідина, вибір яких залежить від природи газу, що поглинається, необхідного ступеня очищення та економічних факторів.

## **Класифікація абсорбційного обладнання**

Абсорбційне обладнання надзвичайно різноманітне за конструкцією, але всі апарати можна класифікувати за способом організації контакту між газом і рідиною. Основними типами є:

* поверхневі абсорбери, в яких контакт відбувається на поверхні плівки рідини;
* насадкові апарати, де рідина стікає по поверхні насадкових тіл;
* тарілчасті колони з організованим контактом на тарілках;
* розпилюючі абсорбери, в яких рідина диспергується у вигляді крапель.

Вибір типу апарата залежить від багатьох факторів: властивостей системи газ-рідина, необхідного ступеня очищення, об'єму газу, що переробляється, наявності механічних домішок у газі, корозійної активності середовищ та економічних показників. Кожен тип обладнання має свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при проектуванні установки.

## **Трубчасті плівкові абсорбери**

Трубчасті плівкові абсорбери належать до найпростіших типів обладнання для абсорбції. Вони складаються з вертикальних труб невеликого діаметру, зазвичай від двадцяти п'яти до п'ятдесяти міліметрів, і довжиною від трьох до шести метрів. Труби об'єднуються в секції за допомогою верхніх і нижніх трубних решіток, подібно до кожухотрубного теплообмінника.

Рідина-поглинач подається зверху абсорбера і розподіляється по трубах, стікаючи вниз тонкою плівкою по їх внутрішній поверхні. Товщина цієї плівки зазвичай становить всього декілька міліметрів. Газ може рухатися як протитечією, тобто знизу вгору, що є найбільш ефективним варіантом, так і прямотечією зверху вниз, якщо це диктується технологічними умовами. Контакт між фазами відбувається на поверхні рідинної плівки, яка безперервно оновлюється.

Головною перевагою плівкових абсорберів є високий коефіцієнт масопередачі завдяки невеликій товщині рідинної плівки і високій турбулізації газового потоку. Гідравлічний опір таких апаратів відносно невеликий, що зменшує енергозатрати на переміщення газу. Конструкція проста і не містить складних внутрішніх пристроїв, що полегшує виготовлення та обслуговування.

Однак плівкові абсорбери мають і суттєві недоліки. Поверхня контакту фаз обмежена внутрішньою поверхнею труб, тому для досягнення необхідного ступеня очищення потрібно встановлювати велику кількість труб, що збільшує габарити установки. Складно забезпечити рівномірний розподіл рідини по всіх трубах, особливо при великій їх кількості. Апарат має вузький діапазон стійкої роботи, оскільки при малих швидкостях газу плівка стікає нерівномірно, а при високих може відбуватися зрив плівки.

Плівкові абсорбери знаходять застосування переважно для процесів з високою інтенсивністю масообміну, коли потрібна невелика поверхня контакту, або коли необхідно мінімізувати гідравлічний опір. Типовим прикладом є охолодження та очищення невеликих потоків агресивних газів.

## **Насадкові абсорбери**

Насадкові абсорбери є одним з найпоширеніших типів обладнання для абсорбції і представляють собою вертикальні циліндричні колони, заповнені спеціальними насадковими тілами. Ці тіла створюють розвинену поверхню, по якій стікає рідина-поглинач, контактуючи з газом, що піднімається знизу вгору.

Конструктивно насадкова колона включає корпус, опорну решітку для підтримки насадки, розподільний пристрій для рівномірної подачі рідини на насадку зверху, сепаратор крапель для уловлювання рідини, що виноситься газом, і штуцери для входу та виходу газу і рідини. Висота насадкового шару може досягати десяти і більше метрів, при цьому для зручності обслуговування насадку часто розділяють на секції висотою по два-три метри з перерозподільниками рідини між ними.

Принцип роботи насадкового абсорбера простий і ефективний. Газ, що потребує очищення, подається знизу колони і рухається вгору через шар насадки. Рідина-поглинач подається на верх колони через розподільний пристрій і стікає вниз тонкою плівкою по поверхні насадкових тіл. При цьому відбувається інтимний контакт між фазами: газ омиває постійно оновлювану поверхню рідини, і компонент, що поглинається, переходить з газової фази в рідку.

Ефективність насадкового абсорбера значною мірою визначається характеристиками насадки. Основними параметрами насадки є питома поверхня, вільний об'єм та еквівалентний діаметр. Питома поверхня показує, яку площу поверхні контакту має один кубічний метр насадки, і вимірюється в квадратних метрах на кубічний метр. Чим більша питома поверхня, тим інтенсивніше йде процес масообміну. Сучасні насадки мають питому поверхню від ста до п'ятисот квадратних метрів на кубічний метр залежно від типу і розміру насадкових тіл.

Вільний об'єм насадки показує, яка частка об'єму колони залишається вільною для проходження газу і рідини. Цей параметр визначає гідравлічний опір шару насадки і межу захлинання апарата. Захлинання відбувається, коли швидкість газу стає настільки великою, що рідина не може стікати вниз і накопичується в апараті, блокуючи прохід газу. Сучасні ефективні насадки мають вільний об'єм від семидесяти п'яти до дев'яноста п'яти відсотків.

Еквівалентний діаметр насадки є характеристикою, що пов'язує вільний об'єм і питому поверхню. Він визначається як відношення потрійного вільного об'єму до питомої поверхні і характеризує середній розмір каналів для проходження газу. Цей параметр використовується при розрахунку гідравлічного опору насадкового шару.

Насадки поділяються на два основні типи: регулярні і нерегулярні. Нерегулярна або насипна насадка складається з окремих тіл однакової форми і розміру, які завантажуються в апарат навалом. Класичним прикладом є кільця Рашига, які являють собою порожнисті циліндри, у яких висота дорівнює діаметру. Вони можуть виготовлятися з кераміки, металу або пластику залежно від властивостей середовища.

Більш досконалими є кільця Палля, які мають отвори в стінках і спеціальні лопаті, вигнуті всередину кільця. Ці лопаті збільшують площу поверхні, покращують розподіл рідини і турбулізують газовий потік. Сідлоподібні насадки, такі як сідла Інталокс або сідла Берля, мають форму, що нагадує сідло, і забезпечують хороші гідродинамічні характеристики завдяки особливій геометрії.

Регулярна насадка являє собою впорядковано організовану структуру, яка встановлюється в апарат у вигляді блоків або секцій. Блочна гофрована насадка складається з тонких металевих або пластикових листів, які гофруються і складаються таким чином, що утворюються похилі канали для руху газу і рідини. Сусідні секції мають різний напрямок гофр, що забезпечує перехресний рух потоків і покращує масообмін.

## **Тарілчасті абсорбери**

Тарілчасті абсорбери представляють собою вертикальні колони, всередині яких на різних рівнях розташовані горизонтальні тарілки. Ці тарілки створюють ступені контакту, на кожному з яких відбувається інтенсивна взаємодія між газом і рідиною. Тарілчасті апарати широко застосовуються в хімічній промисловості завдяки можливості точного розрахунку і прогнозування їх роботи.

Тарілчасті абсорбери поділяються на дві основні групи залежно від способу перетікання рідини з тарілки на тарілку: апарати з провальними тарілками і апарати з переливними тарілками. Ці два типи мають принципово різну конструкцію і характеристики.

Абсорбери з провальними тарілками є найпростішими за конструкцією. Тарілка являє собою горизонтальну пластину з численними отворами, діаметр яких зазвичай становить від трьох до двадцяти п'яти міліметрів. Вільний переріз, тобто сумарна площа отворів, становить від десяти до двадцяти п'яти відсотків від загальної площі тарілки. Відстань між сусідніми тарілками зазвичай вибирається в межах від ста п'ятдесяти до п'ятисот міліметрів залежно від діаметра колони і умов процесу.

Принцип роботи провальної тарілки базується на динамічній рівновазі між газовим потоком і рідиною. Газ проходить через отвори знизу вгору з такою швидкістю, що утримує шар рідини на тарілці, не даючи їй провалюватися вниз. При цьому газ інтенсивно барботує через рідину, утворюючи газорідинну піну або емульсію, в якій відбувається масообмін. Рідина також проходить через ті ж отвори вниз на нижню тарілку, коли локально зменшується швидкість газу або коли накопичується достатній шар рідини.

Абсорбери з переливними тарілками мають більш складну конструкцію, але забезпечують вищу ефективність процесу. Кожна тарілка включає декілька функціональних зон: робочу зону, де відбувається контакт газу з рідиною, зливну зону з переливною перегородкою, переливний стакан для перетікання рідини на нижню тарілку, і прийомну зону на нижній тарілці, куди потрапляє рідина з верхньої.

Рідина надходить на тарілку з верхньої тарілки через переливний стакан і розтікається по робочій поверхні тарілки, рухаючись до протилежного краю, де розташована зливна перегородка. Висота цієї перегородки, зазвичай від двадцяти до вісімдесяти міліметрів, визначає рівень рідини на тарілці. Газ проходить через спеціальні контактні елементи, розташовані на тарілці, і барботує через шар рідини.

Існує декілька типів контактних елементів для переливних тарілок. Ковпачкові тарілки мають металеві ковпачки з прорізами, встановлені над патрубками для проходження газу. Газ виходить з-під ковпачків через прорізи і розподіляється в рідині у вигляді дрібних бульбашок. Клапанні тарілки обладнані рухомими клапанами, що встановлюються над отворами і піднімаються потоком газу, автоматично регулюючи прохідний переріз залежно від швидкості газу.

Ситчасті тарілки з переливом мають прості круглі отвори, як провальні тарілки, але обладнані переливними пристроями, що забезпечують організований рух рідини по тарілці. Струминні тарілки мають щілинні отвори, через які газ виходить у вигляді плоских струменів, інтенсивно перемішуючи рідину.

Переваги абсорберів з переливними тарілками полягають у високій ефективності контакту фаз завдяки організованому руху рідини і газу. Стабільна робота забезпечується в широкому діапазоні навантажень за рахунок наявності переливних пристроїв, які підтримують постійний рівень рідини на тарілці. Можливість точного розрахунку процесу дозволяє передбачити роботу апарата на стадії проектування. Легкість масштабування полегшує перехід від малих до великих апаратів.

Недоліками є високий гідравлічний опір, який може досягати від п'ятисот до двох тисяч паскалів на тарілку залежно від типу контактних пристроїв і режиму роботи. Складніша конструкція порівняно з провальними тарілками збільшує вартість виготовлення. Вища вартість як самих тарілок, так і їх монтажу робить обладнання дорожчим. Чутливість до забруднення особливо виражена у ковпачкових і клапанних тарілках, де можуть закупорюватися отвори і заклинювати рухомі елементи.

Тарілчасті абсорбери знаходять широке застосування в процесах, що вимагають високого ступеня очищення газу або точного контролю процесу. Вони переважніші за насадкові апарати при роботі з рідинами, що мають високу в'язкість або схильністю до утворення піни, оскільки на тарілках легше забезпечити деаерацію і руйнування піни.

## **Абсорбери з рухомою насадкою**

Абсорбери з рухомою насадкою або апарати з киплячим шаром насадки представляють собою особливий тип обладнання, в якому насадкові тіла не закріплені нерухомо, а перебувають у стані псевдозрідження під дією висхідного потоку газу. Цей принцип поєднує переваги насадкових апаратів з інтенсивним перемішуванням, характерним для апаратів з мішалками.

Конструктивно такий апарат являє собою вертикальну колону розширеного перерізу в зоні контакту. В нижній частині розташована опорна решітка, яка підтримує насадкові тіла і через яку подається газ. Насадка складається з легких пластикових або порожнистих металевих тіл сферичної, циліндричної або неправильної форми. Важливо, щоб щільність насадкових тіл була близькою до щільності рідини, що полегшує їх утримання в зваженому стані.

Принцип роботи базується на створенні киплячого шару насадки. Газ подається знизу колони з такою швидкістю, що насадкові тіла піднімаються, утворюючи розширений шар, в якому вони хаотично рухаються, стикаються одне з одним і з стінками апарата. Рідина подається зверху і просочується через киплячий шар насадки, змочуючи поверхню насадкових тіл. При цьому відбувається інтенсивний масообмін між газом і постійно оновлюваною поверхнею рідини.

Для промислового вловлювання діоксиду вуглецю використовуються переважно **насадкові абсорбери зі структурованою насадкою**. Це найпоширеніший тип обладнання в сучасних установках уловлювання CO₂, і на це є вагомі причини.

## **Насадкові абсорбери зі структурованою насадкою - домінуючий вибір**

Насадкові колони зі структурованою насадкою стали промисловим стандартом для вловлювання діоксиду вуглецю на теплових електростанціях та інших великих джерелах викидів. Ці апарати являють собою вертикальні циліндричні колони величезних розмірів: висота може досягати тридцяти-сорока метрів, а діаметр великих промислових колон перевищує десять метрів.

Структурована насадка складається з гофрованих металевих листів, зазвичай виготовлених з нержавіючої сталі або спеціальних корозійностійких сплавів. Ці листи гофруються під певним кутом і складаються в секції висотою від двох до шести метрів. Сусідні секції мають різний напрямок гофр, що створює перехресний потік газу і рідини та покращує масообмін. Така конструкція забезпечує питому поверхню від двохсот п'ятдесяти до п'ятисот квадратних метрів на кубічний метр при вільному об'ємі понад дев'яносто відсотків.

По-перше, гідравлічний опір є критичним параметром при роботі з димовими газами електростанцій. Об'єми газу величезні - мільйони кубічних метрів на годину, і кожні сто паскалів додаткового опору означають значні енергозатрати на роботу димососів. Структурована насадка забезпечує найнижчий гідравлічний опір серед усіх типів контактних пристроїв - від ста п'ятдесяти до трьохсот паскалів на метр висоти, що в два-три рази менше ніж у тарілчастих апаратів.

По-друге, висока ефективність масопередачі дозволяє досягти необхідного ступеня вилучення діоксиду вуглецю при мінімальній висоті колони. Це важливо, оскільки кожен метр висоти збільшує вартість будівництва і складність монтажу. Сучасні структуровані насадки мають дуже високу ефективність - висота одиниці переносу може становити всього пів метра до метра, тоді як для насипної насадки це значення в півтора-два рази більше.

По-третє, можливість масштабування до великих діаметрів без істотної втрати ефективності є унікальною властивістю структурованих насадок. Завдяки впорядкованій структурі каналів газ і рідина розподіляються по перерізу колони значно рівномірніше, ніж у насипній насадці, де каналоутворення стає серйозною проблемою при діаметрах понад два-три метри.

**Типова конфігурація установки вловлювання CO₂** включає дві основні колони: абсорбер і десорбер. Абсорбер є більшим апаратом, оскільки повинен обробляти весь потік димових газів. Димові гази надходять знизу після попереднього охолодження до сорока-п'ятдесяти градусів Цельсія, а розчин моноетаноламіну подається зверху через розподільний пристрій. Абсорбент стікає вниз по поверхні структурованої насадки тонкою плівкою товщиною менше одного міліметра, контактуючи з висхідним потоком газу.

Колона зазвичай ділиться на дві основні секції насадки: нижню промивну секцію висотою п'ять-десять метрів і верхню абсорбційну секцію висотою п'ятнадцять-двадцять п'ять метрів. Промивна секція призначена для зменшення виносу аміну з очищеним газом шляхом промивання водою. Між секціями встановлюються перерозподільники рідини - спеціальні пристрої, які збирають рідину, що стікає з верхньої секції, і рівномірно розподіляють її на нижню секцію, запобігаючи каналоутворенню.

Десорбер або регенератор є меншим за розміром, оскільки обробляє тільки потік насиченого розчину аміну. Він також заповнений структурованою насадкою і працює при підвищеній температурі сто-сто двадцять градусів Цельсія. Тепло підводиться в нижній частині колони через кип'ятильник - теплообмінник, який працює на парі з електростанції. Діоксид вуглецю виділяється з розчину і виходить з верху десорбера, а регенерований розчин аміну стікає вниз і повертається в абсорбер після охолодження.

**Завдання 1.**

Заповніть порівняльну таблицю характеристик різних типів абсорберів:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Тип абсорбера** | **Ефективність** | **Складність конструкції** | **Основні переваги** | **Основні недоліки** |
| Трубчастий плівковий |  |  |  |  |
| Насадковий  |  |  |  |  |
| Тарілчастий |  |  |  |  |
| З рухомою насадкою |  |  |  |  |

## **Контрольні питання:**

1. Що таке абсорбція? Які основні процеси відбуваються при контакті газу з рідиною?
2. Наведіть основну класифікацію абсорбційного обладнання за способом організації контакту фаз.
3. Назвіть типи контактних елементів для переливних тарілок (ковпачкові, клапанні, ситчасті, струминні).
4. Опишіть принцип роботи абсорбера з киплячим шаром насадки.
5. Які основні переваги абсорберів з рухомою насадкою?
6. Що таке абсорбер і десорбер? Яка їх роль у процесі вловлювання CO₂?
7. Чому використовують розчин моноетаноламіну для вловлювання CO₂? При яких температурах відбувається абсорбція і десорбція?
8. Які габарити мають промислові абсорбери для вловлювання CO₂ на великих ТЕС?