

ЛЕКЦІЯ 4

АБСОРБЕРИ

Апарати призначені для проведення процесів абсорбції називаються *абсорберами*. Їх можна розділити на три основні групи:

1. Апарати, в яких поверхнею фазового контакту є *поверхня рідини*, що *розтікається по спеціальній насадці*;
2. Апарати, в котрих поверхня фазового контакту створюється *потоками газу та рідини*;
3. Апарати, в яких поверхня фазового контакту утворюється в наслідок *розбризування рідини*.

Відтак.

2.3.1 Апарати, в яких поверхнею фазового контакту є поверхня рідини, що розтікається по спеціальній насадці

До апаратів вказаного типу відносяться *плівкові* апарати та апарати зі *змоченою насадкою*.

1.1 У плівкових апаратах поверхнею фазового контакту є труби або листова насадка.

В практиці газоочистки їх не застосовують через обмежену поверхню масообміну та низьку турбулізацію потоків.

1.2 Апарати зі змоченою насадкою – *насадочні колони* – виконуються у вигляді прямовисного циліндра, заповненого насадкою. Вона може мати найрізноманітнішу форму, але практично частіше всього застосовують *хордову* насадку, кільця Рашіга, фасоні тіла, металеву стружку, а також кусковий матеріал.

Із них достатньо поширена хордова насадка. Її роблять із дерев'яних дошок, поставлених на ребро. Дошки зшивають у пакети з проміжками між ними, здебільшого на ширину дошки. Пакети встановлюють один на одного з зсувом на певний кут, на висоту визначену розрахунком. Кожний такий збір пакетів опирається на швелери розташовані по діаметру колони. Між

окремими збирами пакетів по висоті колони залишають розриви. Таке компонування запобігає розчавленню нижніх пакетів вагою верхніх разом з вагою плівки води, а крім того, розриви між пакетами зменшують загальний каплевинос.

Свою назву „хордова” насадка достала через те, що дошки насадки являють собою хорди перерізу *колони*.

Кільця Рашіга виробляють переважно керамічними у вигляді циліндрів порожнистих у середині, на зразок короткого шматка труби. Вони мають визначене співвідношення h/d і характеризуються широким діапазоном розмірів, від десятків до сотень мм, що віддзеркалюється в різній питомій поверхні.

В якості кускової насадки зазвичай застосовують кокс або кварцит у вигляді кусків розмірами приблизно 25...75 мм.

Як кільця Рашіга, а так і кусковий матеріал розмішують на перфорованих днищах, встановлених теж на швелерах по висоті колони. Кільця Рашіга розміщують або упорядковано рядами і по днищу, і по висоті, або – хаотично, тобто насипом. Кусковий матеріал завантажують завжди насипом.

Висота одного засипу та їх кількість визначають розрахунком.

Як і у випадку хордової насадки та с тих самих міркувань між окремими засипами залишають розриви по висоті колони.

У підрозділі 1.5.2.2 дана формула для визначення критерію Нусельта у загальному вигляді, як з'єднуючої ланки при розрахунку коефіцієнта масопередачі, та зазначено, що більш конкретно буде наведена при розгляді апаратів масопередачі.

Стосовно насадочних апаратів ця критеріальна залежність має вигляд:

$$Nu'_2 = 0,407 \cdot Re_2^{0,655} (Rr'_2)^{0,33} \left(\frac{H}{d_{\text{екв.}}} \right)^{-0,73}, \quad (42)$$

де H – висота *робочої частини* апарата, м, під якою розуміють саме зону безпосереднього контакту газу з рідиною;

$d_{екв}$ – еквівалентний діаметр насадки:

$$d_{екв} = \frac{4 \cdot V_{\epsilon}}{\sigma},$$

де V_{ϵ} – об'єм пустот в одиниці об'єму насадки або – коефіцієнт вільного об'єму;

σ – поверхня (сумарна) тіл в одиниці об'єму насадки або питома поверхня насадки (величина таблична).

Коефіцієнт масопередачі для пливкої фази β для насадочних колон визначають за формулою:

$$Nu'_p = 0,002 \cdot Re_p^{0,77} (Rr'_p)^{0,5} \quad (43)$$

Насадочні апарати застосовуються в основному в хімічній технології. В процесах санітарної очистки газів практично не використовують через великі габарити, спричиненні малою швидкістю газу (лише 1 м/с), що в свою чергу, зумовлено високим опором насадки, особливо – кускової.

2.3.2 Апарати, в яких поверхня фазового контакту створюється потоками газу та рідини

В цю групу входять колони з *ситчатими*, *ковпачковими* та іншими тарілками.

Загальним для всіх апаратів є наявність тарілок – поземних (горизонтальних) розташованих на визначених відстанях по висоті доземного (вертикального) циліндра.

Тарільчаті колони є значно ефективнішими та продуктивнішими апаратами ніж насадочні колони через можливість застосувати більш високу швидкість газу (декілька м/с), що зумовлює значну турбулізацію потоків та пропускну здатність апарату.

Розрізняють ситчаті, тобто тарільчаті колони з неорганізованим переливом рідини – *провальними* тарілками та з переливними пристроями.

Провальні тарілки

Ці тарілки виконують з металевого перфорованого листа з великою кількістю отворів, що нагадує сито.

При певній швидкості газу знизу тарілки виникає підпір, що заважає рідині вільно стікати через отвори, в наслідок чого на тарілці створюється деякий шар рідини.

Тому на тарілках одночасно відбувається барботаж газу через шар рідини та часткове „провалювання” рідини. На тарілці утворюється гідравлічна піна.

Сумарну площу всіх отворів – так званий „вільний переріз тарілки” – підбирають так, щоб при заданій швидкості газового потоку через частину отворів виникало „провалювання” рідини.

Тарілки з переливними пристроями

Їх відміною є те, що в тарілках, аналогічних провальним, вмонтовані труби, які виступають на певну висоту над тарілкою, що призводить до утворення *фіксованого* шару рідини на тарілці. Нижній кінець кожної трубки занурюється в шар рідини на тарілці, що лежить нижче даної. Така конструкція забезпечує гідравлічний закриття.

Газ, як і на провальній тарілці, також барботує через шар рідини, створюючи гідравлічну піну. Наявність піни, що весь час змінює свою структуру, робить поверхню масопередачі надзвичайно розвиненою, до того ж такою, яка постійно поновлюється. Така якість масообмінної поверхні призводить до високої ефективності масопередачі.

Ці апарати носять назву пінних. Вони знаходять у техніці газоочистки достатнє поширення.

Апарати з кульковою насадкою

Різновидом пристрою, в котрому поверхня контакту фаз утворюється за рахунок взаємодії потоків газу та рідини, є апарати (скрубери) з *кульковою насадкою*.

Шар кульок, які розташовані на тарілці провального типу, утворює запону, що має деякий гідравлічний опір.

При певній швидкості газу, яка може у 3-4 рази перевищувати його швидкість у випадку ситчатої тарілки, виникає динамічний тиск, що стає рівним вазі кульок і вони приходять у стан невагомості. Таку швидкість газу називають *критичною*. При перевищенні цієї швидкості кульки починають хаотично рухатися з тим більшою амплітудою, чим більша швидкість газу. Цей рух нагадує кипіння рідини, що дало назву процесові.

В наслідок дуже сильної турбулізації системи, що складається з газу, рідини та твердих тіл (кульок), утворюється надзвичайно велика масообмін на поверхню у вигляді сумарної поверхні піни, бризок і змочених кульок.

Крім того, велика швидкість газу та рідини – в зоні турбулізації – веде до великих значень критерію Nu' , як для газової, так і для плинної фази, що призводить до суттєвого збільшення коефіцієнтів β обох фаз, а – відтак, – масопередачі у порівнянні з попередніми апаратами.

З цього приводу скрубери з кульковою насадкою відносяться до високоефективних очисних апаратів, а через значну швидкість газу у вільному перерізі – до 10 м/с – високопродуктивних.

Кульки можуть бути виготовлені з будь – якого матеріалу, але обов'язково суцільними. Найкращі результати отримані при використанні кульок з поруватої гуми густиною $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$.

Для ситових тарілок величину критерію Nu' , для газової фази розраховують за виразом:

$$Nu'_z = 2,5 \cdot Re_z^{0,72} (Rr'_z)^{0,5} We^{-0,25}, \quad (44)$$

В цьому рівнянні лінійним розміром „l” в критеріях Nu'_z і Re_z є капілярна константа χ :

$$\chi = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_p}}, \text{ де } \sigma \text{ – поверхневий натяг, а } \rho_p \text{ – густина рідини.}$$

Критерій Вебера We визначають:

$$We = \frac{\sigma}{\rho_p h_{cm}^2} \text{ де } h_{cm} - \text{ висота статичного шару рідини на тарілці.}$$

Для плинної фази критерій Nu'_p розраховують за виразом:

$$Nu'_p = 540 \cdot Re_p^{0,33} (Rr'_p)^{0,45} \quad (45)$$

Апарати з ковпачковими тарілкам

Особливістю цих тарілок є ковпачки, що закривають достатньо великі отвори в переливній тарілці, в котрих закріплені „стакани” – короткі, – на рівні переливу, – трубки. Край ковпачків зазублений для кращого формування бульбашок газу та занурений у рідину, щоб зумовити її контакт з газом.

В санітарній очистці газу не використовуються через малу продуктивність.

2.3.3 Апарати, в яких поверхня фазового контакту утворюється внаслідок розбризкування рідини

Основним апаратом цього типу є *порожнистий форсуноковий скрублер* – доземний сталевий циліндр висотою 10...20 м, в якому газ рухається переважно знизу вверху, а рідина у вигляді краплин – навпаки. Схематично він зображений на рисунку.

Диспергування рідини здійснюється з допомогою *форсунок* – відцентрових, а частіше – евальвентних, розташованих у 2-3 яруси по висоті.

В кожному ярусі форсунок розміщують так і у такій кількості, щоб весь переріз скрубера був перекритий краплинами рідини.

Загалом кажучи, кількість форсунок залежить від їх діаметра та кількості рідини, яка розбризкується, що виражається залежністю:

$$Q_p = nq = nwf = 0.785nwd_\phi^2, \quad (46)$$

де Q_p , n , q , w , f , d_ϕ – кількість рідини, число форсунок, продуктивність однієї форсунки, швидкість витікання рідини з форсунки, площа її отвору та його діаметр – відповідно.

В свою чергу швидкість витікання рідини визначається її тиском:

$$W = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}, \text{ де } P \text{ – тиск рідини.} \quad (47)$$

З іншої сторони, кількість рідини, яку треба розбризкати, Q_p , пов'язана з прийнятою величиною *питомого зрошення „m”*, тобто – кількістю рідини, що зрошує 1 м^3 газу:

$$m = \frac{Q_p}{Q_g}, \text{ де } Q_g \text{ – витрата газу,}$$

звідки

$$Q_p = mQ_g$$

(48)

Згідно з системою СІ, величина „m” – безрозмірна, оскільки Q_p і Q_g – визначаються в $\text{м}^3/\text{с}$. Проте, для зручності, на практиці, її оцінюють в $\text{л}/\text{м}^3$.

Режим роботи форсунокового скрубера крім показника „m”, характеризується ще одним – *щільністю зрошення q*, яка представляє собою кількість рідини, що перекриває переріз скрубера. Між питомим зрошенням і його щільністю існує залежність:

$$q = 3,6 \cdot m \cdot w, \text{ м}^3/\text{м}^2\text{газ,} \quad (49)$$

де w – швидкість газу.

Як видно з виразу (46), кількість форсунок і їх діаметр пов'язані обернено – пропорційною залежністю. Тому, щоб забезпечити кількість форсунок, достатню для належного їх розташування, потрібно зменшувати їх діаметр.

Як відомо, зі збільшенням поверхні масопередачі, збільшується сама масопередача. А чим менше діаметр краплин, тим більше їх утворюється з одиниці об'єму рідини, і тим більша їх сумарна поверхня. В той же час, чим менший отвір форсунки, тим менші краплі він генерує.

З наведених причин на практиці застосовують форсунки з малими отворами, які дають дрібнодисперсний розпил.

Проте, чим менша краплина, тим менша її маса, а відтак, – вага, і тим менша швидкість газу, при якій її динамічний тиск перевищить вагу краплини, що призведе до її виносу газом із скрубера. Таке явище носить назву краплевинос і є дуже небажаним. Тому величина краплевиносу – важливий показник „мокрого” апарата.

За попередніх років (до 70-х) з цієї причини швидкість газу в мокрих апаратах, в тому числі – скруберах, не перевищувала 1,5 м/с.

З інтенсифікацією виробництва, почала різко зростати кількість викидних газів, котрі підлягали очищенню. А при такій швидкості мусила б зростати кількість апаратів, з часом – до недоречних значень.

З цього приводу потрібні стали швидкісні апарати, а це пов’язане з недопустимим краплевиносом. Таким чином газоочистка почала заходити у глухий кут. Пошук виходу призвів до появи у першій половині 70-х років високоефективних краплевловлювачів – циліндричного та конічного завихрювачів.

В розробці останнього велика заслуга гол. інженера Запорізької філії НДІОГазу (Москва) Приходько Вадима Петровича.

Краплевловлювачі нової конструкції дозволили підняти швидкість газу в скрубери до 10 м/с.

Поруч з цим йшов пошук можливості максимального збільшення діаметру скрубера. Дослідження показали, що збільшувати його діаметр понад 6 м недоцільно, через значні труднощі рівномірного розподілу газу по всій площині скрубера.

Всі ці розробки дозволили отримати скрубери великої продуктивності.

Стосовно порожнистого скрубера, коефіцієнт масовіддачі для газової фази β може бути визначений, виходячи з рівняння:

$$Nu'_2 = 2 + 0,552 Re_2^{0,5} (Rr'_2)^{0,33}, \quad (50)$$

приймавши умовно у критеріях Nu' , Re за визначальний розмір „ l ” – діаметр скрубера.

Для плинної фази значення критерію Nu'_p розраховують із виразу:

$$Nu'_p = 1,65 \left(\frac{d_k}{d_\phi} \right)^{-0,73} Re_p^{0,5} (Rr'_p)^{0,33}, \quad (51)$$

де $\frac{d_k}{d_\phi} = \frac{18,3}{Re^{0,59}}$. При цьому d_k і d_ϕ – діаметр краплини та форсунки

відповідно.

За розмір „ l ” у критеріях Nu'_p і Re_p приймають діаметр форсунки d_ϕ .

У випадку добре розчинних газів, опір яких зосереджений у газовій фазі, можна прийняти коефіцієнт масопередачі близьким до коефіцієнта масоотдачі, тобто:

$$K_2 \approx \beta_2$$

Визначення висоти робочої зони скрубера

В основному рівнянні масопередачі (21) $M = K_y \Delta y_{cp} F$ одним з факторів процесу є її поверхня. Проте, визначити її конкретну величину можливо лише для фіксованої насадки, яка використовується в насадочних колонах.

Що стосується сучасних високоефективних високопродуктивних апаратів газоочистки, до яких відносяться порожнистий скрубер та скрубер з кульковою насадкою і, певною мірою, – пінний апарат то, як вже говорилося при розгляді цих апаратів, у них масообмінна поверхня утворюється у першому випадку сумарною поверхнею краплин, а в двох інших – поверхнею піни, бризок та кульок. Всі ці газо – рідинні системи є рухомими, безперервно змінюючи свої параметри, через що поверхню масопередачі неможливо встановити.

Єдиним, що у цьому випадку є відносно сталим – це об'єм апарата, в якому відбувається процес масопередачі. Тому його так і називають – *масопередаючий об'єм*. Він залежить від перерізу апарата та висоти зони

масопередачі – робочої зони, – тобто висоти тої частини апарата, в якій відбувається безпосередній контакт газу з рідиною. В форсунковому скрубєрі за таку висоту можна умовно прийняти відстань між нижнім і верхнім ярусами форсунок, хоча краплини є і нижче нижнього ярусу й вище верхнього, але ці проміжки не чітко окреслюються та й щільність запони з краплин і самі краплини суттєво відрізняється від основної зони.

Відносно пінного апарата та скрубєра з кульковою насадкою, то за висоту робочої зони теж можна прийняти суми усереднених висот підйому піни та бризок на кожній тарілці.

Треба зазначити, що при швидкостях газу наближених до межової (10 м/с), значно зростає винос краплин із робочої зони і при їх затриманні сучасними краплевловлювачами, утворюється додаткова зона високоінтенсивної турбулізації, що посилює масопередачу.

Однак, ці додаткові фактори визначити та врахувати практично неможливо, тому приймають, умовно, основні засади визначення висоти робочої зони так, як було сказане.

Якщо прийняти деякі допущення, то можна розрахувати орієнтовну висоту робочої зони, що дає змогу визначити загальну висоту скрубєра, прийнявши висоту робочої зони $\frac{3}{4}$ загальної висоти.

Вихідним у розрахунку є основне рівняння масопередачі (21) $M = K_p \Delta \bar{C}_{cp} F$, в якому розмірність рушійної сила масопередачі – кг/м^3 , а K_p – коефіцієнт масопередачі віднесений до перерізу.

Оскільки йдеться про масопередаючий об'єм, то відповідно переписуємо рівняння (21):

1. $M = K_v \Delta \bar{C}_c V$, де V – об'єм масообмінної зони, а K_v – коефіцієнт масопередачі віднесений до об'єму.

2. Масу речовини, що передається з фази в фазу в скрубєрі, знайдемо з рівняння матеріального балансу (22): $M = Q(\bar{C}_n - \bar{C}_k)$.

3. Об'єм масообмінної зони запишемо як: $V = Hf$, де H – її висота, а f – переріз скрубєра.

4. Вирішимо рівняння з п. 1 відносно H з урахуванням змін у позначеннях: $H = \frac{Q(\bar{C}_n - \bar{C}_k)}{K_v \Delta \bar{C}_c f}$

(52)

5. Припущення перше: процес масопередачі має лінійний характер. Тоді середня рушійна сила визначається за формулою:

$$\Delta \bar{C}_c = \frac{\Delta \bar{C}_n - \bar{C}_k}{\ln \frac{\Delta \bar{C}_n}{\Delta \bar{C}_k}}, \quad \text{де } \Delta \bar{C}_n, \Delta \bar{C}_k \text{ – рушійна сила на початку та в кінці}$$

процесу масопередачі, тобто внизу та вверху масообмінної зони.

6. Припущення друге: концентрація реагента у рідині достатня для того, щоб забезпечити в усій зоні масопередачі практичну відсутність рівноважної концентрації компонента у газовій фазі, тобто $\bar{C}_p \approx 0$.

$$\text{Звідси } \Delta \bar{C} = \bar{C} - \bar{C}_p = \bar{C}.$$

Відповідно до цього припущення перепишемо рівняння середньої рушійної сили:

$$\Delta \bar{C}_c = \frac{\bar{C}_n - \bar{C}_k}{\ln \frac{\bar{C}_n}{\bar{C}_k}}$$

7. Підставимо новий вираз рушійної сили в рівняння з п.4.

$$H = \frac{Q(\bar{C}_n - \bar{C}_k) \ln \frac{\bar{C}_n}{\bar{C}_k}}{K_v (\bar{C}_n - \bar{C}_k) f} = \frac{Q}{K_v f} \ln \frac{\bar{C}_n}{\bar{C}_k} \quad (52a)$$

Згідно з законом нерозривності потоку визначаємо його витрату як: $Q=wf$, де w – швидкість газу в скрубєрі, а f – його переріз.

Підставивши нові позначення, отримуємо:

$$H = \frac{wf}{K_v f} \ln \frac{\bar{C}_n}{\bar{C}_k} = \frac{w}{K_v} \ln \frac{\bar{C}_n}{\bar{C}_k} \quad (53)$$

З виразу ефективності газу очистки $\eta = \frac{\bar{C}_n - \bar{C}_k}{\bar{C}_n}$ отримаємо кінцеву формулу для визначення \bar{C}_k : $\bar{C}_k = \bar{C}_n(1 - \eta)$.

З урахуванням цього виразу отримаємо кінцеву формулу для розрахунку висоти масообмінної, тобто – робочої – зони:

$$H = \frac{w}{K_v} \ln \frac{\bar{C}_n}{\bar{C}_n(1 - \eta)} = \frac{w}{K_v} \ln \frac{1}{1 - \eta}$$