

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Український державний морський технічний університет  
імені адмірала Макарова

**МЕТОДИ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯНОГО  
СЕРЕДОВИЩА ВІД ЗАБРУДНЕНЬ**

Рекомендовано Методичною радою УДМТУ  
як методичні вказівки

Миколаїв 2002

УДК 658.5

**Рижков С.С., Харитонов Ю.М., Благодатний В.В.**

Методи очищення повітря від забруднень: метод. вказівки –  
Миколаїв, УДМТУ, 2002. – 56 с.

*Кафедра екології*

Розглянуто основні механізми видалення з повітря шкідливих газоподібних, пароподібних та аерозольних домішок. Описано основні гідромеханічні, теплообмінні, масообмінні, хімічні та біохімічні процеси очищення атмосфери від забруднень. Наведено методики визначення ефективності процесів газоочищення та пилоуловлювання.

Рекомендується для студентів спеціальності "Екологія та охорона навколишнього середовища".

Іл. 10, спис. літ. – 19 назв, дод. 1

Рецензент к.т.н., доцент Тимофєєв В.І.

## ВСТУП

Суттєве погіршення екологічної ситуації на Землі в останні десятиріччя значною мірою пов'язане з різким зростанням у ці роки забруднення атмосферного повітря внаслідок господарчої діяльності людства. Негативний вплив на рослинний світ, в тому числі на сільськогосподарські культури, пошкодження конструкційних матеріалів і витворів мистецтва, корозія обладнання, погіршення видимості, парниковий ефект, пошкодження озонового шару, нарешті, погіршення стану здоров'я населення цілих регіонів – ось далеко не повний перелік шкідливих наслідків зростання техногенного навантаження на атмосферу, особливо у промислово розвинених країнах.

Значною мірою це стосується й України, де, в зв'язку з падінням виробництва, хоча і спостерігається в останні роки деяке зменшення шкідливих викидів у атмосферу, проте їх загальна кількість все ж таки залишається значною. Крім того, в ряді регіонів (Донбас, Дніпропетровська область) простежується тенденція до зростання викидів за рахунок погіршення паливного балансу у енергетичній галузі. Найбільший негативний вплив на стан повітря нашої держави спричиняють викиди стаціонарних підприємств енергетики (32 %), металургії (27 %) та вугільної промисловості (23 %). Найбільш забрудненою є атмосфера великих міст. Склад забруднень атмосфери і його рівень постійно зростає за рахунок розвитку автомагістралей, небезпечних виробництв та ін.

Таким чином, завдання очищення атмосферного повітря є на найближчий час вельми актуальним. Одним з головних напрямків цього завдання є розробка методів, засобів, апаратів, та систем очищення повітря від забруднення промисловими викидами, які є головним джерелом погіршення стану атмосфери.

# 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАБРУДНЕНЬ АТМОСФЕРИ

Під забрудненням атмосфери розуміють внесення у повітря або виникнення у ньому фізичних агентів, хімічних речовин або організмів, що негативно впливають на життєве середовище чи завдають шкоди матеріальним цінностям.

Головними джерелами виникнення забруднень є промисловість, енергетика та транспорт. Склад забруднень у кожному конкретному випадку зумовлений специфікою виробництва, причому у деяких випадках всі токсичні речовини не вдається ідентифікувати. Однак номенклатура речовин, що завдають шкоди у порівняльно великих масштабах, не велика. Так, наприклад, в атмосферному повітрі України виявлено 39 забруднюючих речовин. З них близько 60 % складають двоокиси сірки, окис вуглецю, двоокис азоту.

Усі шкідливі домішки, що потрапляють до атмосфери, за своєю природою є органічними або неорганічними речовинами, за агрегатним станом – твердими, рідкими або газоподібними. Відповідно, відхідні гази промисловості є або двофазними системами, де дисперсійною (суцільною) фазою є газ, а дисперсною – тверді частинки (краплини рідини), або однофазними системами газу з газо- чи пароподібними домішками.

Двофазні аеродисперсні системи чи аерозолі поділяють на пил, що містить тверді частинки розміром 5...50 мкм, дим – тверді частинки 0,1...5,0 мкм та туман, що містить краплини рідини розміром 0,3...5,0 мкм. Однофазні системи поділяються на такі, що включають газоподібні або пароподібні токсичні домішки.

Основними характеристиками паро- і газоподібних забруднювачів є їх концентрація, а також фізичні й хімічні властивості: хімічна формула, реакційна здатність, молекулярна маса, температура кипіння (конденсації), густина, розчинність у воді та деяких інших речовинах, тиск пари, в'язкість, питома теплоємність, колір, запах і т.ін. 7

Основними характеристиками аерозолів є:

- густина, що поділяється на істинну, насипну, яка враховує повітряні зазори між частинками щойно насипаного пилу, а також уявну, тобто відношення маси частинок до об'єму, що вони займають, включно з парами, порожнинами, нерівностями і т.п.;

- дисперсність, яка характеризується седиментаційним діаметром кулі, що має таку ж швидкість осадження та густину, як і частин-

ка, діапазоном дисперсності, фракційним складом (процентною місткістю піддіапазонів дисперсності), медіанним діаметром, число частинок крупніших за яких рівні числу частинок, менших за нього, а також середньоквадратичним відхиленням функції розподілу частинок за розміром;

- адгезійні властивості – здатність до злипання та сипкості;
- абразивність – інтенсивність зношення металу при контакті з аерозолем за однакових швидкостях газів і концентрації пилу;
- змочуваність та гігроскопічність;
- електрична провідність шару пилу, що визначається його питомим електричним опором;
- електрична зарядженість частинок;
- здатність частинок пилу до самозаймання та утворення вибухонебезпечних сумішей з повітрям та інші.

## 2. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ І ЗАСОБІВ ГАЗООЧИЩЕННЯ І ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ

Ступінь очищення визначається відношенням кількості матеріалу, що уловлений, до кількості матеріалу, що поступив в апарат газоочищення з газовим потоком за певний проміжок часу

$$\eta = \frac{G'_d - G''_d}{G'_d} = \frac{V'_r C' - V''_r C''}{V'_r C'} = \frac{G'''_d}{V'_r C'},$$

де  $G'_d$ ,  $G''_d$  – масові витрати домішок, що містяться в газах відповідно на вході і виході з апарату, кг/с;  $V'_r$ ,  $V''_r$  – об'ємні витрати газу, що поступають і виходять з апарату відповідно, м<sup>3</sup>/с;  $C'$ ,  $C''$  – концентрація домішок в газі, що поступає і виходить з апарату відповідно, кг/м<sup>3</sup>;  $G'''_d$  – кількість домішок, що уловлені, кг/с.

Для оцінки ефективності апаратів пиловловлювання, у зв'язку з нерівномірністю очищення від частинок пилу різних розмірів, використовують показник фракційної ефективності – ступеню очищення газу від частинок певного розміру:

$$\eta_i = [\Phi' - \Phi''(1 - \eta)] / \Phi',$$

де  $\Phi'$ ,  $\Phi''$  – вміст фракції у газі відповідно на вході й виході з апарату, %.

Тоді загальна ефективність апарату (системи)

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta_i \Phi_i,$$

де  $i$  – номер фракції,  $n$  – їх число.

Для оцінки кінцевої запиленості або порівняння її для різних апаратів використовується коефіцієнт проскоку – відношення концентрації частинок за апаратом до їх концентрації перед ним

$$K_{\text{пр}} = 1 - \eta.$$

### 3. МЕХАНІЗМИ ГАЗООЧИЩЕННЯ ТА ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ

Аерозолі можуть видалятися з газового потоку під впливом гравітаційних, інерційних, відцентрових, термофоретичних, дифузіофоретичних, адгезійних, електростатичних та магнітних сил. Осадженню дисперсних частинок можуть сприяти процеси коагуляції, конденсації та хімічної реакції. Очищення газів від розчинених у них шкідливих домішок відбувається внаслідок фізичної адсорбції, конденсації, хімічної чи біохімічної реакції.

Як зважені, так і розчинені домішки видаляються також за рахунок молекулярної (броунівської) або турбулентної дифузії.

#### 3.1. Гравітаційне осадження

Під гравітаційним осадженням аеродисперсних систем розуміють розділення твердої та газоподібної фази внаслідок дії сил тяжіння.

У нерухомому повітрі ефективність осадження за рахунок гравітаційних сил за час  $t$  може бути оцінена за допомогою рівняння

$$K_{\text{пр}} = \frac{C}{C_0} = \exp\left(-\frac{v_s t}{h}\right),$$

де  $K_{\text{пр}}$  – коефіцієнт проскоку, рівний відношенню масової концентрації аерозолу  $C$  у момент часу  $t$ , до початкової концентрації  $C_0$ ;  $h$  –

шлях осадження;  $v_s$  – швидкість вертикального потоку повітря, в якому частинка знаходиться у зваженому стані – так звана швидкість витання частинки.

Коли аерозольна частинка сферичної форми досягає швидкості витання, сили тяжіння та аеродинамічного опору повітря стають рівними, тому

$$v_s = \frac{(\rho_q - \rho_r) g d_q^2}{18\mu_r},$$

де  $\rho_q, \rho_r$  – відповідно густина аерозольних частинок та газу (повітря);  $d_q$  – діаметр частинки;  $\mu_r$  – динамічна в'язкість газу.

Для ламінарного руху газу з середньою швидкістю потоку  $w_{\text{сеп}}$ , ефективність осадження характеризується співвідношенням

$$\eta = \frac{v_s L}{w_{\text{сеп}} H},$$

де  $L, H$  – відповідно довжина та висота каналу, крізь який протікає газ.

На процес гравітаційного осадження в турбулентних потоках газу суттєвим чином впливають поперечні турбулентні пульсації, середньоквадратична швидкість яких може перевищувати швидкість витання невеликих частинок пилу, ускладнюючи їх уловлювання. Для крупніших частинок осадження відбувається аналогічно процесу у ламінарних потоках.

При осадженні у поруватих шарах (волокнистих матеріалах) ефективність гравітаційної седиментації складає

$$\eta = \frac{v_s}{w_{\text{сеп}} \left( 1 + \frac{H}{R} \right)},$$

де  $R$  – радіус волокна,  $H$  – висота простору між ними.

### 3.2. Інерційне осадження

Інерційне осадження відбувається внаслідок дії сил інерції руху частинок при зміні напрямку аеродисперсного потоку зі значним зменшенням його швидкості. При цьому частинки або осаджуються на перешкодах при обтіканні їх прямолінійними потоками, або

осідають на стінках апаратів (зовнішніх границях потоку) при криволінійному русі газу.

Ефективність інерційного уловлювання передусім залежить від профілю швидкостей у газовому потоці, траєкторії частинки, а також від здатності перешкоди (стінки) утримувати частинки. Отже, визначальними факторами є значення числа Рейнольдса  $Re = u r_{\text{ч}} d_{\text{ч}} / \mu_{\text{г}}$  ( $u$  – швидкість повітря відносно перешкоди), маса та аеродинамічний опір частинки, швидкість газового потоку. Чим більше число Рейнольдса, тим ближче до перешкоди відбувається розділення ліній току, тим різкіше відхиляються від початкової траєкторії лінії току і тим більш імовірним є осадження частинок. При низьких значеннях  $Re$  ( $< 0,5$ ) течія визначається в'язкістю, так, що збурення, які викликані перешкодою, суттєво впливають на картину потоку на досить великих відстанях після себе. Перший тип течії має назву потенціального, а другий – в'язкого. Для потенціальної течії процес осадження розраховується чисельними методами за допомогою критерію Стокса, що характеризує відношення сили інерції до сили опору середовища:

$$St = \frac{1}{18} \frac{d_{\text{ч}}^2 w_{\infty} \rho_{\text{ч}}}{\mu_{\text{г}} l},$$

де  $w_{\infty}$  – швидкість незбуреного потоку, що набігає на перешкоду,  $l$  – характерний розмір перешкоди. Для кожного з геометричного різновиду перешкод (циліндр, пластина і т.п.) існує критичне значення критерію Стокса, нижче якого інерційне осадження частинок теоретично не відбувається. Це справедливо як для в'язких, так і для потенціальних потоків. Вид формули для визначення ефективності осадження також залежить від характеру поля швидкостей та граничних умов (геометрії перешкоди). Наприклад, для потенціальної течії та сфери при  $St > 0,1$  справедлива залежність:

$$\eta_{\text{ін}} = \frac{St^2}{(St + 0,125)^2}.$$

Аналогічні залежності існують для випадків плоскої пластини, циліндра і т. ін.

При тривалому викривленні газового потоку та при порівняно довготерміновому впливі інерційних сил відбувається сепарація навіть невеличких частинок до зовнішніх границь. Внаслідок спільної

дії сили, пов'язаної з прискоренням сепараційного руху

$$m \frac{dv_c}{dt}, \text{ і спрямованої, у викривлену частину потоку;}$$

відцентрової сили  $m\omega^2 R$ , спрямованої по радіусу закруглення потоку; сили реакції частинки на гальмуючий вплив середовища

$$m \left( \frac{d\omega}{dt} R \right); \text{ с и л и}$$

Коріоліса  $2m(\omega v_c)$  (рис.1), де  $m$  – маса частинки;  $R$  – радіус закруглення потоку;  $\omega$  – кутова швидкість;  $v_c$  – відносна швидкість руху частинки;  $t$  – час.

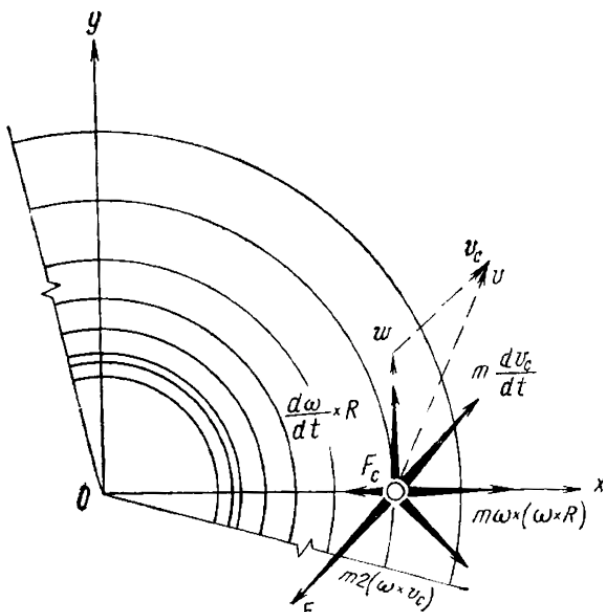


Рис. 1. Сили взаємодії частинки та середовища у криволінійному потоці.

Розрахунок цього переміщення частинок при взаємодії вказаних складових з аеродинамічною силою є досить складною проблемою і вирішується за допомогою методу послідовних наближень.

### 3.3. Дотик

Уловлювання аерозольних частинок шляхом дотику відбувається тоді, коли відстань між поверхнею перешкоди і лінією потоку, по якій рухається частинка, не перевищує радіуса частинки. На відміну від інерційного в цьому випадку з поверхнею перешкоди стикається поверхня, а не центр частинки. Ефективність уловлювання за рахунок дотику при умові, що частинка рухається по лінії потоку в потенціальній течії, описується залежністю:

$$\eta_{\text{дот}} = \left(1 + \frac{d_{\text{ч}}}{d_{\text{п}}}\right)^2 - \frac{1}{1 + \frac{d_{\text{ч}}}{d_{\text{п}}}},$$

де  $d_{\text{п}}$  – діаметр перешкоди.

Для в'язкої течії справедливе рівняння:

$$\eta_{\text{дот}} = 1 + \frac{d_{\text{ч}}}{d_{\text{п}}} - \frac{1}{1 + \frac{d_{\text{ч}}}{d_{\text{п}}}}.$$

### 3.4. Дифузія

Дифузія – це рух частинок середовища, що призводить до вирівнювання концентрацій частинок чи встановленню їх рівноважного розподілення. Перенос речовини може здійснюватися за рахунок молекулярної або турбулентної дифузії.

Молекулярна дифузія являє собою перенесення маси молекулами речовини внаслідок впливу концентраційних температурних градієнтів, градієнтів тиску або в разі наявності зовнішнього направленого потенціалу (наприклад, електричного). Найчастіше в практиці газоочищення використовується теплова або звичайна дифузія, що відбувається в результаті хаотичного теплового руху молекул. При цьому рух молекул відбувається повільно, тому що вони постійно стикаються між собою і відхиляються у випадкових напрямках. А втім, при різниці концентрацій у суміжних областях молекулярний потік з області високої концентрації переноситиме більше молекул, ніж потік з області низької концентрації. Результуючий дифузійний

потік  $q_m$  буде пропорційний градієнту концентрацій  $\frac{dc}{dn}$  (перший закон Фіка)

$$q_m = -D_m \frac{dc}{dn},$$

де  $D_m$  – коефіцієнт дифузії, що характеризує здатність даної речовини проникати внаслідок дифузії у нерухоме середовище незалежно від гідродинамічних умов проходження процесу.

При термодифузії більш важкі компоненти суміші газів переміщуються в області з нижчою температурою (в напрямку градієнту температур), а більш легкі – в протилежному напрямку. Таким чином, у холодніших зонах підвищується концентрація більш важких компонентів, а у тепліших зонах – більш легких. Аналогічно протікають процеси бародифузії та вимушеної дифузії.

В турбулентному потоці процес масопереносу відбувається в результаті перемішування й злиття вихрових течій, що виникають при швидких та нерегулярних пульсаціях швидкості газу або рідини. Такий процес називається турбулентною або вихровою дифузією. Кількість речовини, що переноситься внаслідок турбулентної дифузії,  $q_t$ , також пропорційна градієнту концентрацій

$$q_t = -D_t \frac{dc}{dn},$$

де  $D_t$  – коефіцієнт турбулентної дифузії, що на відміну від  $D_m$  не є фізичною константою, та залежить від гідродинамічних умов, передусім, від швидкості та масштабу турбулентності.

Виключно молекулярна дифузія може відбуватися тільки у нерухомому середовищі. При русі газу (рідини) спільно з цим процесом відбувається перенесення речовини самим середовищем у напрямку, що співпадає з напрямком потоку – конвективна дифузія (конвективний масоперенос). Розподілення концентрацій при конвективному масообміні визначається диференціальним рівнянням масообміну у середовищі, що рухається

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + w \cdot \text{grad} c = D_m \nabla^2 c,$$

де  $c$  – концентрація речовини, що розподіляється,  $w$  – швидкість потоку,  $\tau$  – час. Оскільки в цьому рівнянні швидкість потоку є змінною величиною, його треба вирішувати спільно з рівнянням руху рідини Нав'є-Стокса та рівнянням нерозривності потоку за допомогою чисельних методів. На практиці масообмінні процеси описуються із застосуванням теорії подібності.

При масообміні з твердою фазою окрім зовнішньої дифузії речовини, в газі відбувається внутрішня дифузія речовин, що розподіляється в порах твердого тіла. Цей процес може переходити аналогічно звичайній молекулярній дифузії за умови, що розміри пор значно перевищують величину середнього вільного пробігу молекул. При

малих розмірах пор або низькому тиску суттєвого значення набуває кнудсенівська дифузія, зумовлена хаотичним відскакуванням молекул від стінок пор після зіткнення. Адсорбція компонента твердою речовиною призводить до появи явища поверхневої дифузії, яка викликана зростанням рівноважної поверхневої концентрації та виникненням її градієнта, співнаправленого з градієнтом концентрації газу в порах.

Загалом, процес внутрішньої дифузії можна описати рівнянням, аналогічним першому закону Фіка для молекулярної дифузії

$$q = -k \frac{dc}{dn},$$

де  $k$  – коефіцієнт масопровідності (внутрішньої дифузії), що визначається експериментально.

При уловлюванні аерозольних частинок субмікрометрових розмірів суттєве значення може мати теплова або броунівська дифузія, що викликана зіткненням частинок з молекулами газу, які хаотично рухаються. Кількість таких зіткнень для кожної з сторін частинки невелика, тиск на неї зі сторони молекул повітря (на відміну від великих частинок) не врівноважений, тому частинка набуває змінного за швидкістю і напрямком руху і хаотично зміщується з напрямку лінії течії. При цьому можливе осадження аерозолів на перешкодах, кількість яких, враховуючи хаотичний характер руху, визначається імовірнісними функціями. Для дифузії частинок у нерухомому середовищі справедливе рівняння Фіка:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 c}{\partial x^2},$$

де  $c$  – концентрація частинок,  $t$  – час,  $x$  – відстань до нерухомої поверхні,  $D_a$  – коефіцієнт дифузії частинок аерозолі, що залежить від розмірів частинок і температури повітря.

При турбулентній течії характер дифузії частинок визначається співвідношенням їх розмірів із масштабом турбулентності. Якщо розмір частинок більший за масштаб турбулентності, вони переміщуються з повільними великомасштабними пульсаціями повітря, а якщо він менший – з дрібномасштабними. Такий перенос називають турбофорезом.

Розрахунок ефективності осадження при броунівській дифузії

здійснюється за допомогою критерія Рейнольдса та дифузійного критерія Пекле

$$\text{Re}_D = \frac{d_u w_\infty}{D_a}.$$

Зокрема, для в'язкого обтікання циліндру

$$\eta_D = 2,92(2 - \ln \text{Re})^{-1/3} \text{Re}_D^{-2/3}.$$

Для потенціального обтікання

$$\eta_D = 3,19 \text{Re}_D^{-1/2}.$$

Поблизу поверхні випаровування (конденсації) виникає градієнт концентрації водяної пари. Аерозольні частинки переміщуються у напрямку падіння концентрації пари. При випаровуванні частинки віддаляються від краплин рідини, а при конденсації – наближаються. Це явище має назву дифузіофорезу і викликане дією сил, зумовлених стефанівським рухом і переміщенням імпульсу газової суміші. Стефанівський рух є гідродинамічною силою, що необхідна для підтримання рівномірного тиску в дифузійній газовій суміші і спрямована за градієнтом концентрації пари. В тому ж напрямку частинки рухаються в результаті бомбардування молекулами пари зі сторони більш високої її концентрації. Швидкість дифузіофорезу не залежить від лінії течії та розміру частинок і виражається рівнянням:

$$u_D = \frac{P \cdot D_{\pi} \sqrt{M_{\Gamma}}}{(P_{\Gamma} \sqrt{M_{\Gamma}}) (P_{\Gamma} \sqrt{M_{\Gamma}} + P_{\pi} \sqrt{M_{\pi}}) P_{\Gamma}} \nabla P_{\Gamma}.$$

Тут  $P$ ,  $P_{\Gamma}$ ,  $P_{\pi}$  – відповідно загальний тиск та парціальні тиски газу і насиченої пари;  $M_{\Gamma}$ ,  $M_{\pi}$  – відповідно молекулярні маси газу і пари;

$D_{\pi}$  – коефіцієнт дифузії пари в газі.

При наявності перепадів температур у повітрі, наприклад, біля нагрітих або охолоджених тіл, виникає рух аерозольних частинок в напрямку, протилежному температурному градієнту – термофорез. Якщо діаметр частинок менший за середню довжину вільного пробігу молекул, то причиною термофорезу є зіткнення частинок з молекулами газу, які впливають на неї з теплішого та холоднішого боків і з різними середніми швидкостями. Термофоретична сила в

цьому випадку зумовлена різницею імпульсів з кожної із сторін (рис.2а), а швидкість руху частинки –

$$U_T = \frac{6\alpha_r \nabla T}{(8 + \pi) T \rho_r},$$

де  $\rho_r$  – густина газу;  $\alpha_r$  – доля молекул газу, що відбиваються частинкою;  $T$  – температура. Якщо ж розмір частинки значно перевищує величину середнього вільного пробігу, причиною термофорезу є нерівномірний нагрів поверхні частинки, внаслідок чого молекули газу від теплішої сторони відлітають з більшою швидкістю, ніж від холоднішої. В результаті частинка набуває імпульсу, що направлений в бік зменшення температури, а газ – протилежно спрямованого імпульсу (рис.2б), рухаючись зі швидкістю

$$U_T = - \frac{(4k_r + 0,5k_c) \mu_r \nabla T}{(2k_r + k_c) \rho_r T},$$

де  $\mu_r$  – в'язкість газу;  $k_r, k_c$  – відповідно коефіцієнти теплопровідності газу та частинки.

Частинним випадком термофорезу є фотофорез, тобто рух частинок аерозолі внаслідок їх нерівномірного освітлення. Напрямок переміщення частинок визначається їх формою і розміром, прозорістю та показником заломлення матеріалу. В прозорих частинках відбувається негативний фотофорез, тобто рух частинок назустріч світлу, в результаті більшого нагріву задньої по відношенню до джерела світла сторони. В непрозорих частинках навпаки, сторона, що

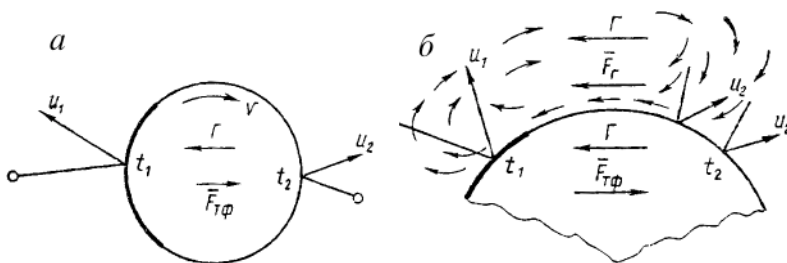


Рис.2. Термофорез

а – високодисперсних частинок; б – крупнодисперсних частинок;  
 $u$  – швидкість молекул газу;  $t$  – температура;  $v$  – швидкість частинки;  
 $\Gamma$  – градієнт температури;

наведена до світла, буде більш гарячою, тому напрямок фотофорузу буде зворотнім. В окремих випадках спостерігається рух, перпендикулярний потокові світла.

### 3.5. Осадження в полі дії електричних сил

На аерозольні частинки, що рухаються у електростатичному полі та наближаються до перешкоди, може діяти п'ять видів електростатичних сил:

- кулонівська сила взаємодії між зарядженою перешкодою та незарядженою частинкою;

- індукційна сила взаємодії між поверхнею та незарядженою частинкою;

- індукційна сила взаємодії між зарядженими частинками та незарядженою поверхнею;

- сила відштовхування, з якою уніполярні заряджені частинки діють на частинки аерозолі, що осаджуються;

- сила притягання між зарядженою частинкою аерозолі та заземленим колектором, що має заряд, індукований навколишніми уніполярними частинками аерозолі.

Як правило, в даних конкретних умовах переважає тільки один з зазначених механізмів. Кулонівська сила є головною при рівномірному розподіленні по перешкоді заряду, протилежного за знаком частинкам. Якщо заряджений тільки аерозоль, основною силою є індукційна. При високій концентрації аерозолі ( $>10^7$ ) суттєвими стають сили відштовхування та притягання між зарядженими частинками. Так у наелектризованих волокнистих шарах ефективність уловлювання визначається дією сили притягання між зарядженою частинкою аерозолі та її відбиттям на перешкоді:

$$\eta_E = 1,5(K_E)^{1/2},$$

де для циліндричного тіла

$$K_E = (\epsilon - 1)(\epsilon + 1) \frac{q_q^2 c'}{12\pi^2 \epsilon_0 d_{\pi} \mu_r d_q u_0},$$

де  $\epsilon$  – діелектрична постійна;  $q_q$  – заряд частинки;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-21} \text{Ф/м}$  – діелектрична проникність у вакуумі;  $d_{\pi}$  – діаметр перешкоди;  $u_0$  – швидкість руху частинки відносно газового потоку;  $c'$  – безрозмірний поправковий коефіцієнт Канінгхему для течії з ковзанням.

### 3.6. Магнітне уловлювання

Дія магнітного поля може сприяти видаленню з газового потоку частинок, що мають електричний заряд. Під впливом магнітних сил, направлених перпендикулярно до руху цих частинок, останні можуть відхилитися від початкової траєкторії зі швидкістю

$$u_m = \frac{Hq_{\text{ч}}c'}{3\pi\mu_{\text{г}}d_{\text{ч}}},$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля,  $u_{\text{г}}$  – швидкість течії газу.

Малі магнітні частинки у магнітному полі зорієнтовуються відповідно розміщенню полюсів магніту. Переміщення частинок визначатиметься алгебраїчною сумою цих сил. Ефект зміщення може бути суттєвим також при наближенні магнітних частинок до феромагнітного металу.

### 3.7. Коагуляція

В загальному випадку коагуляцією називається зменшення ступеню дисперсності, тобто числа частинок дисперсної фази при їх агрегації (злитті). Збільшення рідких аерозолів має назву коалесценції. Коагуляція, причиною якої є броунівський рух частинок, називається броунівською, або довільною, а коагуляція, що виникає під впливом зовнішніх сил (гідродинамічних, електричних, гравітаційних) – вимушеною. Сама по собі коагуляція не є механізмом уловлювання частинок, але може суттєво покращити їх седиментацію (осадження).

Швидкість броунівської коагуляції описується рівнянням Смолюховського:

$$\frac{dc}{dt} = kc^2 = -\frac{4}{3} \frac{RTc'^2}{\mu_{\text{г}}N_A},$$

де  $R$  – універсальна газова постійна,  $k$  – константа коагуляції,  $N_A$  – число Авогадро.

У ламінарному потоці при зіткненнях частинок внаслідок різниці їх швидкостей виникає градієнтна коагуляція, інтенсивність якої  $N$ ,  $1/(m^3c)$ .

$$N = \frac{32}{3} c_0^2 d_{\text{ч}}^3 \text{grad} u,$$

де  $c_0$  – початкова концентрація частинок;  $\text{grad } u$  – градієнт швидкості частинки.

У турбулентних потоках можливе або повне захоплення турбулентними пульсаціями частинок з густиною, порівнянною з густиною потоку, що сприяє їх зіткненням, або співударення частинок, які мають різну масу і відповідно різну інерцію та швидкість флуктуацій. Цей механізм має назву механізму прискорення і є основним у коагуляції в полідисперсних системах.

Швидкість коагуляції у турбулентному потоці за першим меха-

$$\text{нізмом } N \approx 1,3 \sqrt{\frac{\varepsilon}{v_r}} d_q c_0^2, \text{ за другим механізмом } N = \pi \frac{\rho_q}{\rho_r} c_0^2 \frac{\varepsilon^{3/4}}{v_r^{5/4}} \beta d_q^4.$$

Тут  $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної,  $\text{см}^2/\text{с}^3$ ;  $v_r$  – кінематична в'язкість газу,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\beta$  – коефіцієнт, що характеризує розподіл частинок за розмірами.

Вплив електростатичних сил на коагуляцію може бути позитивним або негативним в залежності від знаку заряду частинок. Швидкість коагуляції частинок з протилежним знаком вища, ніж у нейтральних, а у останніх вища, ніж у частинок, що однойменно заряджені.

Кількість зіткнень для незаряджених частинок:

$$\Phi = 8\pi d r c,$$

для частинок аерозолі з однойменним зарядом:

$$\Phi = \frac{\gamma \Phi_0}{\exp(\gamma) - 1},$$

для частинок аерозолі з зарядом протилежного знаку:

$$\Phi = \frac{|\gamma| \Phi_0}{1 - \exp(-|\gamma|)}, \text{ де } \gamma = \frac{q_i q_j}{d_q k T}.$$

Тут  $d$  – характеристичний розмір;  $r$  – радіус кривизни частинки;  $\Phi_0$  – кількість зіткнень між частинками за рахунок броунівської дифузії;  $q_i, q_j$  – заряди аерозольних частинок;  $k$  – константа Больцмана;  $T$  – температура.

Наведений заряд від електричного поля викликає притягання частинок, орієнтованих у напрямку вектора напруженості поля і відштовхування частинок, розміщених перпендикулярно йому. Новоутворена частинка набуває більш високого дипольного моменту,

тому що її поздовжня вісь паралельна напрямку напруженості поля. Це прискорює коагуляцію.

Ультразвукові та звукові хвилі у певних діапазонах частоти та інтенсивності коливань можуть суттєво інтенсифікувати процес коагуляції. На частинки в акустичному полі впливають коливання газового середовища, гідродинамічні сили притягання та відштовхування, а також звуковий тиск. Під впливом звукових хвиль частинки інтенсивно вібрують, стикаючись з іншими частинками та збільшуючись в розмірах. Після того, як вони збільшуються настільки, що коливальний рух стає утрудненим, процес продовжується за рахунок зіткнень з великими та малими частинками.

Швидкість руху аерозольних частинок під впливом акустичних коливань

$$\frac{dl}{dt} = \frac{F_g c' \sin\left(\frac{2\pi d_q}{\lambda}\right)}{3\pi\mu_r d_q},$$

де  $F_g$  – максимальний тиск звукового випромінювання,  $\lambda$  – довжина хвилі.

Якщо опір газового потоку підкоряється закону Стокса

$$\frac{dl}{dt} = \frac{128\mu_r l^4}{\rho d_q^5 \Delta v^2},$$

де  $\Delta v$  – відносна зміна (амплітуда) швидкості зближення частинок.

Крім зазначених факторів, на процес коагуляції можуть впливати гравітаційні поля, відцентрові сили і т.ін., які викликають різницю у переміщенні окремих частинок (кінематична коагуляція).

### 3.8. Конденсація

Конденсація, тобто перехід речовини з газоподібного у рідкий стан при зниженні її температури до величин, менших за температуру насичення, іноді спільно з підвищенням тиску, може бути краплинною або плівковою. В першому випадку конденсат осаджується у вигляді окремих краплин, а у другому утворює суцільну плівку рідини. Краплинна конденсація відбувається, якщо рідина не зможе поверхню теплообміну. При усталених режимах конденсат, як правило, зможе поверхню, тобто відбувається плівкова конденсація.

Режим течії плівки є функцією критерію Рейнольдса. З утовщенням плівки на гладкій поверхні ламінарна течія поступово переходить у хвильову, а потім у турбулентну. На хід процесу впливають фізичні властивості конденсату (густина, в'язкість, теплопровідність), а також параметри поверхні (розміри, розташування, шорсткість).

Витрати конденсату  $G_k$  залежать від теплоти, що передана від пари до стінки  $Q$  співвідношенням:

$$G_k = \frac{Q}{r} = \frac{\alpha F \Delta t}{r},$$

де  $F$  – площа поверхні,  $m^2$ ;  $\Delta t$  – різниця у температурах між стінкою та насиченою парою,  $^{\circ}C$ ;  $r$  – питома теплота пароутворення,  $Дж/кг$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ , який визначається за рівнянням:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_{рід}}{l},$$

де  $Nu = C(Ga \cdot Pr \cdot K)^{0,25}$  – критерій Нуссельта;  $Ga = gl^3 \left( \frac{\rho_{рід}}{\mu_{рід}} \right)^2$  – кри-

терій Галілея;  $Pr = c_{рід} \frac{\mu_{рід}}{\lambda_{рід}}$  – критерій Прандтля;  $K = c_{рід} \frac{r}{\Delta t}$  – крите-

рій конденсації;  $l$  – характерний розмір,  $m$ ;  $\rho_{рід}$ ,  $\mu_{рід}$ ,  $\lambda_{рід}$ ,  $c_{рід}$  – відповідно густина рідини,  $кг/м^3$ , її динамічна в'язкість,  $Н \cdot с/м^2$ , теплопровідність,  $Вт/(м \cdot K)$ , теплоємність,  $Дж/(кг \cdot K)$ .

Якщо у парі присутні гази, що не конденсуються, наприклад, повітря, коефіцієнт теплопровідності різко знижується, тому що інші гази поступово накопичуються у паровому просторі, тим самим підвищуючи свій парціальний тиск, знижуючи парціальний тиск пари, погіршуючи омивання стінки парою і зменшуючи  $\Delta t$ . На процес конденсації впливають склад парогазової суміші, тиск, температура, а також параметри поверхні.

Зважені у повітрі частинки аерозолі у насиченій або ненасиченій атмосфері можуть виконувати роль центрів конденсації за умови, що їх розміри перевищують критичну величину. Поверхні, що не розчиняються, наприклад, тверді частинки у аерозолі, збільшу-

ють швидкість конденсації при певному співвідношенні їх радіусу з розмірами краплини і у певному діапазоні кутів змочування. На угнутій поверхні частинок пара буде конденсуватися краще, ніж на опуклій, тому що тиск пари на поверхні буде у першому випадку нижчим. Присутність у аерозолі розчинених частинок сприяє утворенню центрів конденсації, тому що рівноважний тиск пари над розчином нижчий, ніж над чистою рідиною.

Краплина критичного розміру зростає зі швидкістю (ідеальна пара, тиск і температура постійні, краплини рухаються відносно газового потоку):

$$d_k - d_{k_0} = \frac{8DMt}{\rho_{\text{рід}}RT} (p_{\text{п}} - p_0) \left(1 + 0,276 \text{Re}_{\text{ч}}^{1/2} \text{Pr}_{\text{Д}}^{1/3}\right).$$

де  $d_k, d_{k_0}$  – поточний і початковий діаметри краплини відповідно;  $D$  – коефіцієнт дифузії пари;  $R$  – газова стала;  $T$  – температура;  $M$  – молекулярна маса;  $p_{\text{п}}, p_0$  – парціальний тиск пари у газовій фазі та над поверхнею краплини відповідно;  $t$  – час;  $\text{Re}_{\text{ч}}$  – число Рейнольдса для частинок,  $\text{Pr}_{\text{Д}} = \mu_{\text{рід}} / (\rho_{\text{рід}} D)$  – дифузійне число Прандтля (число Шмідта,  $\text{Sc}$ ).

Процес триває до тих пір, доки тиск пари у навколишній атмосфері не знижується до рівноважного внаслідок конденсації пари або міграції частинок у інші області.

### 3.9. Фізична адсорбція

Фізична адсорбція – це поглинання речовини поверхнею найчастіше твердого поглинача – адсорбенту під впливом сил Ван-дер-Ваальса. Молекулярні сили притягання можуть утримувати на поверхні адсорбенту як один, так і кілька шарів молекул речовини, що поглинається, – відповідно мономолекулярна та полімолекулярна адсорбція. Фізична адсорбція є повністю зворотнім процесом.

Існуючі теорії адсорбції, як правило, можуть застосовуватися тільки для певних умов проведення процесу, певних типів адсорбентів і речовин, які поглинаються.

Так, згідно з теорією Ленгмюра причиною адсорбції є ненасиченість валентностей у поверхневих атомів чи молекул адсорбенту. Кожна молекула речовини, що адсорбується (адсорбтиву) стикається з вільною поверхнею адсорбенту (елементарною площинкою), причому кожна елементарна площинка може адсорбувати тільки одну

молекулу адсорбтиву. Таким чином, на поверхні поглинача утворюється мономолекулярний шар. Теорія Ленгмюра задовільно описує процес мономолекулярної адсорбції в області малих та середніх насичень і не може бути застосована для полімолекулярної адсорбції.

Згідно з потенціальною теорією сили Ван-дер-Ваальса діють на достатньо великій відстані, тому на поверхні адсорбенту утворюється декілька шарів молекул речовини, що поглинута (адсорбату), в кожному з яких густина зменшується по мірі віддалення від адсорбуючої поверхні. Кожній точці адсорбованого шару відповідає свій адсорбційний потенціал  $\varepsilon$ , що є роботою сил Ван-дер Ваальса при переміщенні однієї молекули з нескінченності у точку на відстані  $\chi$  від поверхні адсорбенту.

$$\varepsilon = \varphi(\chi) = R T \ln \frac{P}{P_n},$$

де  $P_n$  – тиск насиченої пари абсорбтиву;  $P$  – парціальний тиск абсорбтиву.

Адсорбційний потенціал не залежить від температури, а тільки від роду речовин, що поглинаються, тому відношення потенціалів для двох різних речовин на одному адсорбенті при рівних адсорбційних об'ємах постійне і рівне коефіцієнту афінності  $\beta_a$ . Тож  $\beta_a$  може бути визначений як відношення мольних об'ємів даної речовини та стандартної (бензолу) при тих же умовах. Ця теорія може застосовуватися для опису адсорбції на неполярних поглиначах парів неполярних речовин.

Для пор, розміри яких порівняні з розмірами молекул, потенціальна теорія незадовільна. В цьому випадку адсорбційне поле існує у всьому об'ємі пор, що викликає їх об'ємне заповнення в ході процесу, яке з високою точністю описується самостійною теорією об'ємного заповнення мікропор.

Незалежно від теорій адсорбції встановлено, що кількість речовини, адсорбованої масовою чи об'ємною одиницею поглинача, залежить від температури процесу та концентрації адсорбтиву в парогазовій суміші. Тож при постійній температурі справедлива залежність

$$a^* = f(t), \text{ або } a^* = f(P/P_n),$$

де  $a^*$  – концентрація адсорбату (величина адсорбції);  $t$ ,  $P_n$  – температура та тиск процесу відповідно. Ця функція описується ізотермами

адсорбції (рис.3), від яких залежить від природи адсорбтиву та температури.

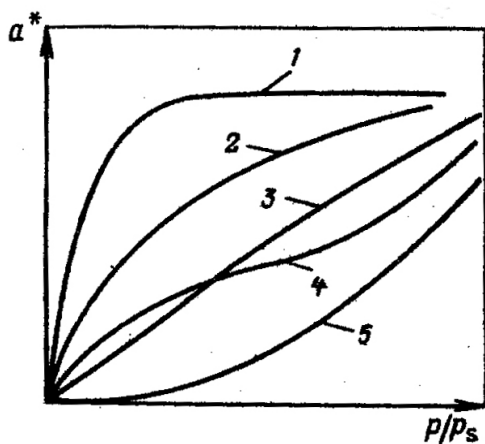


Рис.3. Форми і зотерм адсорбції:  
1 – різкоопукла, 2 – опукла; 3 – лінійна;  
4 – S-подібна; 5 – угнута.

Найбільш поширеними математичними залежностями, що описують ізотерми адсорбції є:

–емпіричне рівняння Фрейндліха, справедливе у випадку мономолекулярної адсорбції:

$$a^* = kP^{1/n},$$

де  $P$  – тиск;  $k$ ,  $n$  – постійні для даної температури коефіцієнти;

–рівняння Ленгмюра, отримане на підставі теорії мономолекулярної адсорбції (крива 1):

$$a^* = \frac{bPa_m}{1 + bP},$$

де  $a_m$  – максимальна величина адсорбції (при тиску насиченої пари адсорбтиву),  $b$  – коефіцієнт, що залежить від температури;

–БЕТ-рівняння виведене на базі теорії полімолекулярної адсорбції Брунаером, Емметом і Теллером, що задовільно описує ізотерми як мономолекулярної, так і багаточислової адсорбції – криві 2 і 3:

$$a^* = a_m \frac{cP}{(P_n - P)[1 + (c - 1)P/P_n]},$$

де  $c = \exp \frac{Q_i - \lambda}{RT}$  – константа, що залежить від теплоти адсорбції в

першому шарі  $Q_i$  та теплоти конденсації пари адсорбтиву  $\lambda$ .

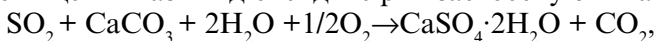
Згідно з теорією об'ємного заповнення мікропор у загальному випадку

$$a^* = \frac{W_0}{V_M} \exp \left[ -\frac{BT^2}{\beta_a} \lg \left( \frac{P_n}{P} \right)^2 \right],$$

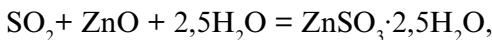
де  $W_0$  – сумарний об'єм пор адсорбенту;  $V_M$  – об'єм адсорбату у рідкому стані при температурі  $T$ ;  $B$  – константа, що залежить від структурного типу адсорбенту.

### 3.10. Хімічна реакція

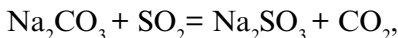
Для газоочищення використовують найрізноманітніші хімічні реакції: окислення, відновлення, нейтралізації, екзо- і ендотермічні реакції – в залежності від хімічного складу забруднюючої речовини. Зокрема, для очищення газів від оксидів сірки застосовують вапно:



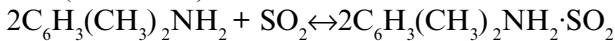
оксид цинку:



розчин соди:

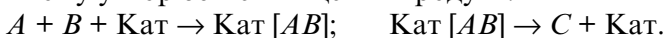


ароматичні аміни (ксилидин):



та інші речовини. Для очищення газів від оксидів азоту використовуються вода, аміак, луги, солі. Очищення від оксиду вуглецю здійснюється за допомогою мідно-аміачних, мідь-алюміній-хлоридних розчинів, рідкого азоту і т.д.

Досить поширеними у газоочищенні є каталітичні реакції, за участю речовин, що суттєво прискорюють хід процесу, залишаючись незмінними після його закінчення, – каталізаторів. Дія останніх полягає не у зменшенні рівноваги реакції, а у прискоренні її досягнення за даної температури. Сутність прискорюючої дії каталізаторів – зниження енергії активації, необхідної для проходження реакції в результаті зміни реакційного шляху або ініціації ланцюгового механізму реакції. Наприклад, якщо за відсутності каталізатора реакція відбувається за схемою  $A+B \rightarrow C$ , то в його присутності процес включає стадію утворення проміжного комплексу  $[AB]$ , з якого у подальшому утворюється кінцевий продукт:



Сумарна енергія активації обох стадій менша, ніж у випадку

прямих реакцій. Прискорююча дія каталізатора виражається рівнянням

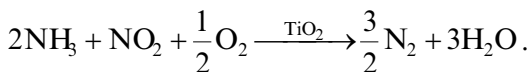
$$k = k_0(-E/RT),$$

де  $k$  – константа швидкості реакції,  $k_0$  – передекспоненційний множник,  $E$  – енергія активації. Якщо  $k_0=1$ , характеристикою прискорюючої дії є активність  $A$  – співвідношення швидкостей реакцій за участю каталізатора  $k_k$ , і без нього  $k$ :

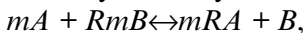
$$A = k_k/k = \exp(\Delta E/RT),$$

де  $\Delta E$  – енергія активації. Оцінка активностей каталізатора для різних умов визначається за відношенням кількості продуктів реакції до об'єму, маси або площини поверхні каталізатора.

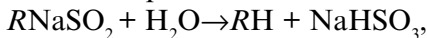
Для очищення газів використовують процеси гомогенного та гетерогенного каталізу. Гомогенний каталіз, коли реагенти та каталізатор є газами, полягає в утворенні між реагентами і каталізатором нестійких проміжних сполук – також газів, після розпаду яких каталізатор регенерується. При гетерогенному каталізі, як правило, реакція відбувається між газоподібними речовинами у присутності твердого каталізатора. З гетерогенних каталітичних реакцій в процесах газоочищення зазначимо селективне каталітичне відновлення оксидів азоту



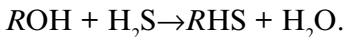
При наявності достатньої кількості вологи, шкідливі домішки можуть видалятися за допомогою реакції іонного обміну – квазігомогенного хімічного процесу обміну іонами між водною системою та твердою фазою (іонітом), оснований на проявленні об'ємних сил хімічної взаємодії між іонами та молекулами внаслідок різниці хімічних потенціалів. В загальному випадку



наприклад, катіонообмінна реакція



аніонообмінна



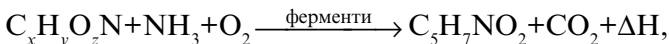
### 3.11. Біохімічні реакції

Сутність біохімічних реакцій полягає в розкладанні органічних і частково неорганічних речовин та синтезі нових, які здійснюються живими організмами в процесі їх життєдіяльності. В процесах газо-

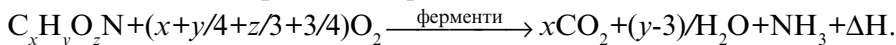
очищення використовуються реакції аеробного окислення та анаеробного бродіння.

Біохімічні процеси перетворення речовини проходять всередині клітин мікроорганізмів і являють собою досить складний процес безперервних хімічних перетворень з великим числом реакцій, що закінчуються окисленням речовини з виділенням енергії та синтезом нових речовин із витратами енергії. Роль каталізаторів цих реакцій виконують ферменти – складні білкові з'єднання, які можуть включати як прості білки, так і білкову частину – носій, та небілкову – кофермент, що і має каталітичні властивості. Реакція проходить у активних центрах на поверхні молекул ферментів, причому кожен з реакцій каталізує відповідний фермент, і продукт реакції служить субстратом для наступної реакції. Присутність деяких речовин – активаторів (вітамінів, катіонів  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Hs}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ) підвищує активність ферментів, інших – інгібіторів (солі важких металів, антибіотики), навпаки, знижує її.

Аеробні перетворення всередині клітин бувають анаболічними і катаболічними. Анаболічні призводять до синтезу нових клітинних компонентів:

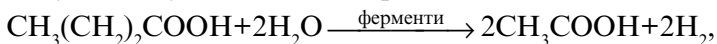


а катаболічні є джерелами енергії, що необхідна для клітини

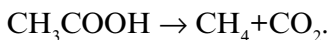


Тут  $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z\text{N}$  – органічні речовини;  $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$  – середнє співвідношення основних елементів у клітинній речовині бактерій,  $\Delta\text{H}$  – енергія.

В анаеробних умовах органічні речовини розкладаються в процесі бродіння, з утворенням здебільшого  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$  та деяких інших речовин. Процес проводиться гідролітичними бактеріями, які здійснюють початковий гідроліз субстрату до низькомолекулярних органічних з'єднань (спиртів, органічних кислот, газів); гетероацетатними бактеріями, які розкладають жирні кислоти, спирти та ароматичні з'єднання (спільно з метаногенними бактеріями), продукуючи оцтову кислоту та водень, наприклад (масляна кислота),



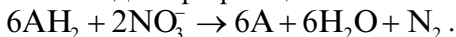
а також метаногенними бактеріями, що споживають водень (літотрофи) та оцтову кислоту (ацетотрофи), продукуючи метан:



Під впливом нітрифікуючих бактерій в аеробних умовах проходять процеси нітрифікації – окислення азоту амонійних з'єднань до нитритів, а потім – до нітратів:



а у анаеробних умовах – денітрифікації:



Сірчані бактерії окислюють з'єднання сірки до сірчаної кислоти та сульфатів.

#### 4. ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ У ГАЗООЧИЩЕННІ ТА ПИЛОУЛОВЛЮВАННІ

В залежності від основних законів, що визначають швидкість проходження процесів у техніці газоочищення та пилоуловлювання, можна виділити такі групи останніх (див. додаток):

- гідромеханічні процеси (розділення неоднорідних систем), швидкість яких визначається законами гідродинаміки;

- теплові процеси (конденсація, нагрів, охолодження), які проходять зі швидкістю, що визначається законами теплопередачі, але в той же час залежать від гідродинамічних умов руху середовищ, що взаємодіють;

- масообмінні процеси (абсорбція, адсорбція, іонний обмін), які характеризуються перенесенням компонентів з однієї фази в іншу крізь поверхню розділу фаз і описуються законами масопередачі з урахуванням гідромеханічних і теплообмінних умов;

- хімічні процеси (гетерогенний каталіз, термічне знешкодження), швидкість яких визначається законами хімічної кінетики, як правило, тепло- і масопереносу, а також гідродинамічними умовами;

- біохімічні процеси (аеробні та анаеробні), що проходять зі швидкістю, залежною, насамперед, від кінетики ферментативних реакцій при впливі законів хімічної кінетики, гідродинаміки, тепло- і масопереносу.

За способом організації основні процеси у газоочищенні та пилоуловлюванні поділяються на періодичні, коли всі стадії процесу проходять в одному апараті, але у різний час; безперервні, коли всі

стадії процесу проходять одночасно, але у різних апаратах, а також комбіновані, окремі стадії яких проводяться періодично чи безперервно.

В залежності від змін параметрів у часі можна виділити усталені (стаціонарні) процеси з постійними у часі характеристиками та неусталені (нестационарні) процеси зі змінними характеристиками.

#### **4.1. Механічне пилоуловлювання**

Механічне осадження аерозолів належить до гідромеханічних процесів. Виділення шкідливих речовин в даному випадку здійснюється за рахунок сил тяжіння чи інерції, або і тих, і інших. Відповідно розрізняють гравітаційне пилоуловлювання, коли частинки осаджуються з потоку газу в основному під дією власної ваги, та інерційне, коли потік зважених частинок раптово змінює напрямок свого руху, і аерозольні частинки виділяються переважно за рахунок сил інерції. Важливим частинним випадком інерційного пилоуловлювання є відцентрове, яке виникає при наданні газовому потоку обертального або вихрового руху, причому більш важкі частинки пилу переміщуються в напрямку дії відцентрової сили швидше за молекули газу та концентруються біля стінок газоочисного апарату, звідки потім видаляються. В деяких випадках важливого значення у пилоуловлюванні набувають сили Коріоліса. Перед здійсненням зазначених процесів у деяких випадках частинки підлягають акустичній коагуляції для покращення осадження.

#### **4.2. Фільтрування**

Фільтрування відбувається при проходженні забрудненого газу крізь поруваті перегородки, що пропускають газ, затримуючи частинки аерозолію. В залежності від структури умовно виділяють гнучкі поруваті (папір, тканини синтетичних матеріальних волокон, повсть, пінополіуретан), напівжорсткі поруваті (шари волокон, стружка, в'язані сітки, розташовані на опорних пристроях) і жорсткі поруваті перегородки (зернисті матеріали, відформовані шари скловолокон, перфоровані листи).

У процесі фільтрації можна виділити початкову стаціонарну стадію, коли ефективність уловлювання та гідравлічний опір визначаються тільки структурою перегородки, властивостями частинок та параметрами газового потоку, і нестационарну, коли внаслідок

дії т.зв. вторинних процесів відбуваються зміни у фільтруючому середовищі і зазначені характеристики змінюються у часі.

Основними механізмами уловлювання аерозольних частинок при фільтруванні є (рис. 4):

– дотик, що відбувається, коли частинка рухається мимо перешкоди на відстані, меншій за свій радіус;

– інерція, тобто зіткнення частинки з перешкодою внаслідок сходження з первісної лінії течії під впливом інерційних сил (ефективна для частинок діаметром завбільшки 1 мкм);

– броунівська дифузія внаслідок випадкового зіткнення при хаотичному русі частинок, менших за 1 мкм, з перешкодою;

– електростатичне осадження, що виникає, коли частинка та перешкода мають заряди протилежних знаків;

– термофорез, тобто зміщення частинки до перешкоди під впливом температурного градієнту;

– гравітаційне осадження внаслідок сил притягання між частинкою і перешкодою або земного тяжіння;

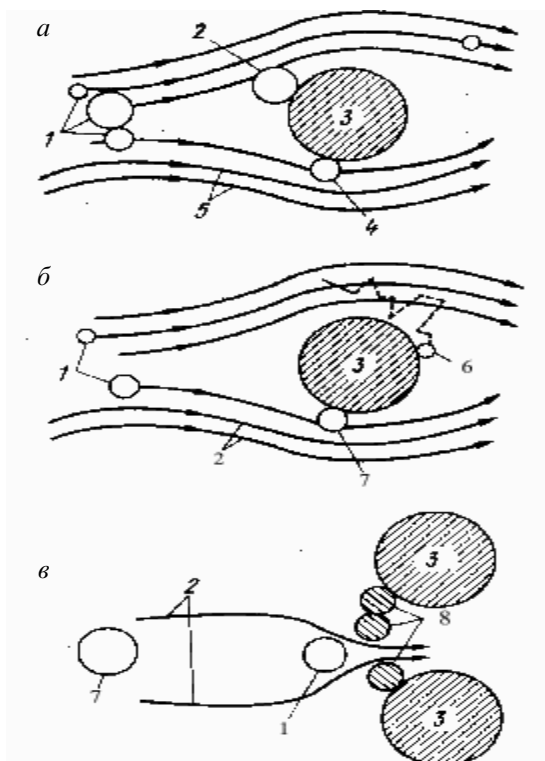


Рис. 4. Механізми уловлювання частинок при фільтруванні:

*а* – ефект дотику та інерції; *б* – дифузія та електрична сила; *в* – ситовий ефект;

1 – частинки; 2 – лінії течії; 3 – волокно; 4 – ефект дотику; 5 – інерційне захоплення; 6 – дифузія; 7 – електростатична сила; 8 – частинки, що раніше захоплені.

– ситовий ефект, коли частинка завелика, щоб пройти крізь дану пору або канал.

Роль кожного механізму визнається розміром волокон, поруваністю шару, розміром та густиною зважених частинок, швидкістю газового потоку, теплофізичними та електричними властивостями газу аерозолі та перегородки. На початку роботи фільтру головними механізмами є дотик, інерція та дифузія. З плином часу, внаслідок утворення в порах шару осаду, домінуючим стає ситовий ефект. Вплив гравітації та термофорезу, як правило, незначний.

Основними вторинними процесами є:

– співосадження (кольматація), тобто осадження частинок, що поступають переважно на вже осажені частинки аж до утворення розгалужень, що спочатку призводить до підвищення ефективності, а потім до забивання фільтрів;

– капілярні явища (при фільтрації туманів): утворення плівки рідини на волокнах, накопичення рідини в місцях їх зхрещення, капілярна конденсація парів води у місцях контакту частинок з волокном чи одне з одним, злипання сусідніх волокон під дією капілярних сил – все це загалом веде до зміни структури та підвищенню гідравлічного опору матеріалів;

– деструкція матеріалу під впливом агресивних середовищ або температури;

– втрата електричного заряду при проходженні іонізованого чи вологого повітря або накопичення радіоактивного пилу – суттєво знижує ефективність уловлювання;

– відскок частинок від волокон, коли їх кінетична енергія після зіткнення перевищує енергію адгезії або відриваюча сила аеродинамічного опору більша за адгезійні сили;

– унесення уловлених частинок з поверхні волокон при подальшому пропусканні газів, наприклад, підвищенні швидкості фільтрації.

Частина фільтруючих матеріалів може регенеруватися шляхом продування зворотнім потоком низького тиску або імпульсом стиснутого повітря, вібрацією, чи вимиванням частинок рідиною.

Ефективність фільтрів здебільшого визначається експериментально. Іншою важливою характеристикою фільтруючих матеріалів є пилоємність, тобто маса чи об'єм пилу, що відкладається у фільтрі при збільшенні його опору на задану величину. Запропоновано також безрозмірний критерій якості фільтру

$$K_{\text{я}} = - \frac{n \lg \eta}{\lg \frac{H(G_y = \eta - 0,2)}{H(G_y = \eta)}},$$

де  $\eta$  – ефективність уловлювання пилу у шарі,  $G_y$  – кількість уловленого пилу,  $H=f(G_y)$  – опір фільтруючого шару. Чим гірше показники ефективності та пилоємності, тим більше  $K_{\text{я}}$ .

### 4.3. Мокре пилоуловлювання.

Мокре очищення газів відбувається при контакті запиленого газу з рідиною на поверхні краплин, що рухаються крізь газ; на поверхні плівки, що стікає по насадці, вертикальній або похилій площині; на поверхні бульбашок газу, що підіймаються у рідині (барботаж), або при ударі газових струменів об рідку чи тверду поверхню.

Процес осадження аерозольних частинок на поверхні краплин рідини найчастіше описується двома моделями. Перша базується на кінематичній коагуляції, яка виникає при осадженні частинок на краплинах води, що падають внаслідок гравітаційних сил, або вводяться у аерозоль зі швидкістю, вищою за седиментаційну. Друга розглядає процес осадження аналогічно фільтрації газів крізь мілкозернистий фільтр, сегментами якого є краплини води. Осадження частинок на плівку рідини залежить від співвідношення зовнішньої сили, сили тяжіння і сил відштовхування (рис.5). Перша значною мірою визначається кінетичною енергією частинок, а останні залежать від форми поверхні рідини (кут  $\alpha$ ), форми частинок (кут  $\beta$ ) та їх змочуваності (кут  $\theta$ ). При барботажі процес пилоуловлювання визначається в основному силами інерції, седиментації та дифузії частинок, вплив кожної з яких залежить від розміру частинок і швидкості підйому бульбашок і аналогічний ефекту осадження у волокнистих фільтрах.

Основними механізмами уловлювання частинок є:

- відцентрове осадження при зміні напрямку руху частинок, як правило, більших за 5 мкм;

- інерційне захоплення і дотик, які істотні при зміні напрямку руху частинок розміром до десятих долей мкм;

- броунівська дифузія частинок порівняльно малого розміру, що дифундують випадковим чином внаслідок співударянь з молекулами газу;

–електроста-  
тичне осадження  
частинок, які ма-  
ють електричний  
заряд;

–дифузіофо-  
рез, тобто осад-  
ження частинок  
разом з водяною  
парою, яка конде-  
сується на холод-  
ній поверхні води;

–термофорез –  
зміщення частинок  
до холодної по-  
верхні внаслідок  
різної інтенсив-  
ності її бомбарду-  
вання газовими  
молекулами з різ-  
них напрямків при  
наявності теплопе-  
редачі від газу до  
рідини;

–гравітаційне осадження;

–плівкова конденсація водяної пари на поверхні частинок, яка хоч і не є, власне, механізмом уловлювання, але сприяє підвищенню ефективності інерційного осадження;

–коагуляція, тобто злипання частинок при зіткненні внаслідок броунівського чи турбулентного руху, що також призводить до підвищення ефективності осадження.

Загалом, головними механізмами уловлювання є інерційне осадження частинок діаметром більшим за 3 мкм і броунівська дифузія частинок діаметром меншим за 3 мкм. В певних випадках значним може бути вплив відцентрових сил, термо- і дифузіофорезу. Гравітаційне осадження не має особливого значення.

Як вважає більшість дослідників, ефективність мокрого пилоуловлювання визначається, передусім, витратами енергії на здійснення процесу: енергії турбулентних пульсацій газового потоку при-

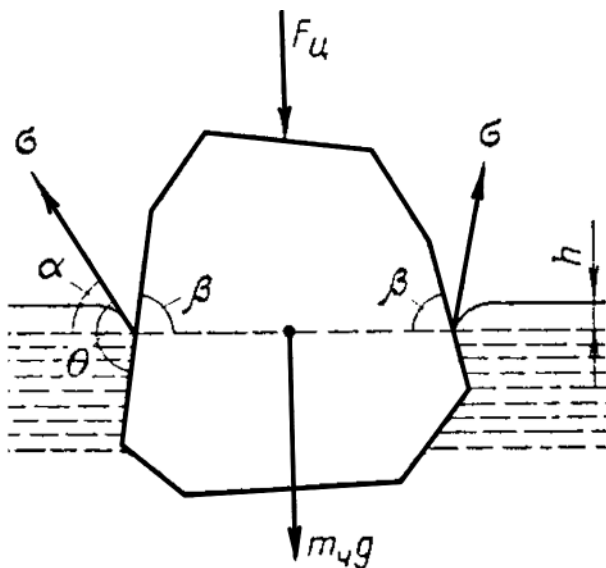


Рис.5. Рівновага частинки пилу  
на поверхні рідини

$F_u$  – зовнішня сила;  $m_u g$  – сила тяжіння;  $\sigma$  – по-  
верхневий натяг;  $\alpha$  – рівноважний кут;  $\theta$  – кут  
змочування;  $\beta$  – кут форми;  $h$  – різниця висот  
рівня рідини та параметру змочування.

близко рівною гідравлічному опору  $\Delta P$ , енергії рідкої фази, витраченої на збільшення поверхні контакту, наприклад, на диспергацію, а також механічної енергії, яка витрачається на приведення в дію елементів, що обертаються. Таким чином, витрати енергії на здійснення мокрого очищення виражає величина енергії зіткнення  $K_q$ , яка приблизно рівна:

$$K_q \cong \Delta P + P_p \frac{V_p}{V_r} + \frac{N_M}{V_r},$$

де  $P_p$  – напір рідини, що розпилюється, Н/м<sup>2</sup>;  $V_p$ ,  $V_r$  – об’ємні витрати відповідно рідини та газів, м<sup>3</sup>/с;  $N_M$  – потужність приводу, Вт.

Ефективність уловлювання

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

де  $B$ ,  $k$  – експериментальні константи, які характеризують властивості та склад пилу. Інколи ( $\eta \geq 98...99\%$ ) для оцінки ефективності використовують кількість одиниць переносу:

$$N_q = \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right) = BK_q^k.$$

Інтенсифікація процесу можлива шляхом контактування гарячого насиченого газу з холодною водяною та твердою поверхнею, що стимулює процеси конденсації, термо- і дифузіїфорефу, шляхом електростатичного зарядження частинок, у деяких випадках доцільним є використання поверхнево-активних речовин.

#### 4.4. Електростатичне осадження

Цей процес відрізняється від інших наявністю безпосередньої, а не прямої дії на частинки сили осадження, що виникає внаслідок іонізації молекул електричним розрядом. Процес проходить три основні стадії: зарядження зважених частинок в електричному полі, рух до електродів з осадженням на них та видалення осадженого матеріалу.

Як правило, для зарядження використовується коронний розряд, що утворюється між електродами, де різниця потенціалів складає до кількох десятків тисяч вольт. При цьому іони та електрони інтенсивно переміщуються у напрямку силових ліній електричного

поля, іонізуючи шляхом розщеплення на позитивні іони та вільні електрони зустрічні молекули газу. Таким чином, газ повністю іонізується, і між двома електродами виникає розряд, що характеризується світінням, потріскуванням і утворенням корони навколо т. зв. коронуючого (як правило негативного) електроду. Щоб уникнути проскоку іскр, електричного пробоя та короткого замикання, його виконують у вигляді тонкого дроту, а інший, осаджувальний (найчастіше позитивний) електрод – у вигляді трубки або паралельних пластин, створюючи неоднорідне електричне поле (рис.6).

При проходженні запиленого газу крізь поле корони постійного струму аерозольні частинки заряджаються або іонами, які рухаються до них під впливом зовнішнього електричного поля, або іонами, які дифундують крізь газ внаслідок теплового руху. Польовий механізм зарядження переважає для частинок діаметром завбільшки за 0,5 мкм, дифузійний – для частинок менших за 0,2 мкм, для решти істотними є обидва механізми. При високій напрузі електричного поля важливого значення набуває зарядження частинок електронами, що рухаються з високою швидкістю та співударяються з частинками. На процес може негативно впливати високий питомий електричний опір частинок, велика концентрація високодисперсних частинок, а також замала чи висока швидкість газу. В першому випадку може бути іскровий пробій, або утворення зворотної корони, в другому – подавлення току корони об'ємним електричним зарядом, в третьому – емісія з осаджувального електроду частинок з позитивним зарядом.

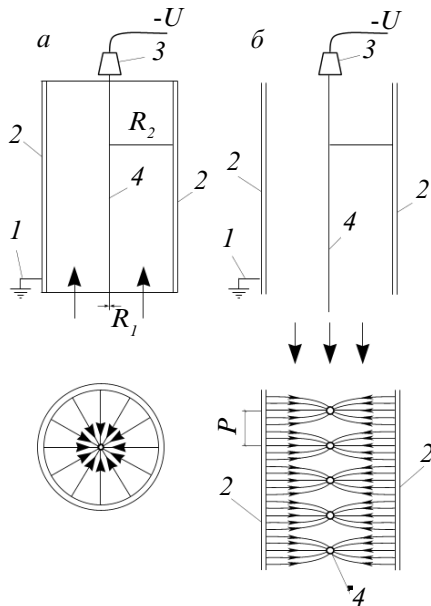


Рис.6. Розташування електродів для створення неоднорідного електричного поля: 1 – заземлення; 2 – осаджувальний електрод; 3 – підвід напруги; 4 – коронуючий електрод;

Процес осадження визначається співвідношенням кулонівських або електричних сил з силами гідродинамічного опору, прискорюючись зі зростанням швидкості частинок. Як правило, рух газу є турбулентним, тому на характер течії впливають також електричний вітер корони, а при високих концентраціях пилу – рух маси аерозолі. Тож осадження невеликих частинок залежить насамперед від поля турбулентної течії і лише у другу чергу - від електростатичних сил. Останні набувають першочергового значення лише тоді, коли частинки потрапляють у ламінарний граничний шар біля осаджувального електроду. Оскільки траєкторії руху при цьому надзвичайно складні, ефективність осадження оцінюється на основі ймовірностного підходу. В загальному випадку

$$\eta_{\text{ел}} = 1 - \int_0^{\infty} \Phi(x) \exp\left[-\frac{F_{\text{ос}} w(x)}{V}\right] dx,$$

де  $\Phi(x)$  – функція розподілення частинок за розмірами;  $F_{\text{ос}}$  – площа осадження;  $w(x)$  – швидкість міграції частинок;  $V$  – швидкість руху газу.

Зазначене рівняння вирішується аналітичним шляхом для частинних випадків, наприклад, нормального розподілення частинок і польового зарядження.

Частинки, що осіли, видаляються з осаджувального електроду під впливом сил тяжіння, вібраційних сил або внаслідок взаємодії з плівкою рідини, що стікає по електроду.

#### 4.5. Магнітна фільтрація

Сутність магнітофільтраційного очищення полягає у видаленні магнітосприйнятливих (ферромагнітних, феррімагнітних, антиферомагнітних), а також супутних частинок та іонів при проходженні газового потоку крізь шар насадки, що намагнічена. При цьому формується поле високої напруженості та високої осаджувальної дії, тому частинки підпадають під силовий осаджувальний вплив, що сприяє високій ефективності очищення.

В процесі магнітної фільтрації можна виділити дві стадії. Спочатку ефективність уловлювання частинок залишається практично постійною, а потім починає знижуватися з дедалі більшою інтенсивністю. Причинами такого характеру течії процесу є малий об'єм захоплення частинок по відношенню до об'єму пор, а також дистан-

ційний характер впливу магнітного поля на частинки. В результаті при локалізації зон захоплення та осаду поблизу точок контакту гранул насадки, останній істотно не впливає на закономірність осадження, а утворення слабкомагнітних частинок у зонах захоплення аж до їх заповнення не знижує поглинальних властивостей насадки. Тільки по мірі накопичення осаду понад граничне значення його об'єму активна довжина насадки починає скорочуватися за рахунок поступового відпрацювання комірок.

Стадія стаціонарного поглинання описується моделлю проникнення течії односортних частинок крізь квазісуцільний екран – поглинач. Ступінь поглинання магнітних частинок  $\eta'_m$  по довжині гранульованої насадки визначається за рівняннями

$$\eta'_m = \lambda [1 - \exp(-\alpha L)] = \lambda \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sigma}{d^3 L}\right) \right],$$

де  $L$  – довжина насадки,  $\lambda$  – доля магнітосприйнятливої фракції частинок;  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання;  $\sigma$  – ефективний перетин насадки, тобто перетин поблизу точки контакту гранул, потрапляючи у межі якої частинка осаджується;  $d$  – діаметр гранули.

Для стадії зниження ефективності уловлювання на основі моделі спонтанного зменшення активної довжини насадки отримано залежність

$$\eta''_m = \lambda \left\{ 1 - \exp \left[ -\alpha \left( L - d \frac{\tau - \tau_0}{\Delta \tau} \right) \right] \right\},$$

де  $\tau$  – поточне значення часу;  $\tau_0$  – час номінального фільтроциклу;  $\Delta \tau$  – середній час між відпрацюванням послідовно розташованих комірок.

#### 4.6. Теплові процеси

Конденсація – процес видалення з газів розчинених у них шкідливих домішок – може бути ефективною, якщо температура пари речовини достатньо близька до точки роси. Цей процес відбувається при контакті газів із холодною рідиною чи повітрям або охолодженою твердою поверхнею.

Спочатку охолодження проходить за рахунок конвекції. Ентальпія поверхні контакту при цьому зменшується аж до повного насичення.

чення газової фази компонентом, що конденсується. При подальшому охолодженні гази дифундують до поверхні теплопередачі та конденсуються там. Враховуючи різницю у парціальних тисках насичення для різних газових домішок, процес проводять у одну або дві (з попереднім охолодженням) стадії. Якщо пари розчинника перебувають під надлишковим тиском, то застосовують метод компримування з аналогічним механізмом.

Швидкість утворення конденсату на холодній поверхні визначається як швидкістю теплопередачі, так і швидкістю дифузії. Остання може бути великою при високій концентрації компонентів, що конденсуються. Але при їх значному видаленні швидкість дифузії може стати визначальною. Якщо до того ж коефіцієнт дифузії цільового компоненту невеликий, дифузії майже не відбувається, і у газовій фазі утворюється туман.

При підготовці газів до очищення або перед випуском у атмосферу їх можуть, в залежності від вимог санітарних норм та технологічного процесу, підігрівати або охолоджувати. Як і у випадку конденсації, гази можуть контактувати з тепло- чи холодоносієм безпосередньо, або через поверхню. При безпосередньому контакті з рідиною можливе зволоження газів.

#### 4.7. Абсорбція

Під абсорбцією розуміють процес поглинання газів або парів з газової або парогазової суміші рідкими поглиначами – абсорбентами.

При фізичній абсорбції газ, що поглинається (абсорбтив), не взаємодіє з абсорбентом хімічно, при наявності такої взаємодії має місце хемосорбція. Як правило, процес фізичної абсорбції є оборотним, що дає змогу багаторазово використовувати абсорбент, який вилучається з розчину в результаті зворотніх процесів десорбції. В усіх зазначених процесах рушійною силою є різниця між парціальним тиском домішки у газі (рідини) та рівноважним тиском над плівкою рідини, що контактує з газом.

У стані рівноваги, згідно з законом Генрі, розчинність газу у рідині  $x^*$  пропорційна його парціальному тиску  $P_A$  над рідиною за даної температури

$$x^* = \frac{P_A}{E},$$

де  $E = \exp\left(-\frac{q}{RT} + C\right)$  – константа Генрі;  $q$  – диференціальна теплота

розчинення газу;  $R$  – газова стала;  $C$  – константа, що залежить від природи газу та поглинача;  $T$  – температура.

Відповідно для вмісту компоненту у газовій фазі в стані рівноваги  $y^*$ :

$$y^* = x \frac{E}{P},$$

де  $x$  – мольна концентрація газу в розчині;  $P$  – загальний тиск у системі.

Як видно з наведених рівнянь, розчинність газу в рідині зростає з підвищенням тиску і зменшенням температури.

Закон Генрі справедливий лише для малих концентрацій газу або при його малій розчинності. У зворотньому випадку відношення  $E/P$  є величиною змінною, розчинність менша, ніж за законом Генрі, проте загальний характер її залежності від тиску залишається таким же. При хемосорбції закон Генрі слід відносити тільки до концентрації газу, що не прореагував.

Процес фізичної абсорбції складається зі стадій масопередачі у газовій та рідкій фазах і масопередачі через границю розділу фаз. Перенос речовини всередині кожної з фаз відбувається за рахунок молекулярної, конвективної або турбулентної дифузії (дивіться розд. 3.4) і описується відповідними рівняннями. Перенесення речовини від границі розділу фаз чи у зворотньому напрямку розглядається на основі рівнянь гідродинаміки та конвективної дифузії, спільне рішення яких у загальному вигляді неможливе, і тому використовуються моделі. Плівкова (двоплівкова) теорія виходить з існування з обох боків від поверхні контакту фаз нерухомих або ламінарних шарів (плівок) певної товщини, перенесення речовини через які відбувається стаціонарною молекулярною дифузією (рис.7а). Модель дифузійного (турбулентного) пограничного шару припускає існування поблизу поверхні контакту в'язкого пограничного шару, через який шляхом турбулентної дифузії переноситься більша частина речовини. При цьому коефіцієнт турбулентної дифузії поступово зменшується до нуля на поверхні контакту, і у цьому т.зв. пограничному дифузійному шарі масоперенесення відбувається мо-

лекулярною дифузією. Згідно з теорією оновлення поверхні, кожен елемент останньої взаємодіє з газом протягом невеличкого часу шляхом нестационарної дифузії, після чого оновлюється (змивається турбулентними пульсаціями) (рис.7б). Всі згадані моделі є справедливими лише для деяких частинних випадків. Тому на практиці здебільшого використовують експериментальні дані, оброблені за допомогою теорії подібності.

Перенесення газу з однієї фази в іншу описується рівнянням

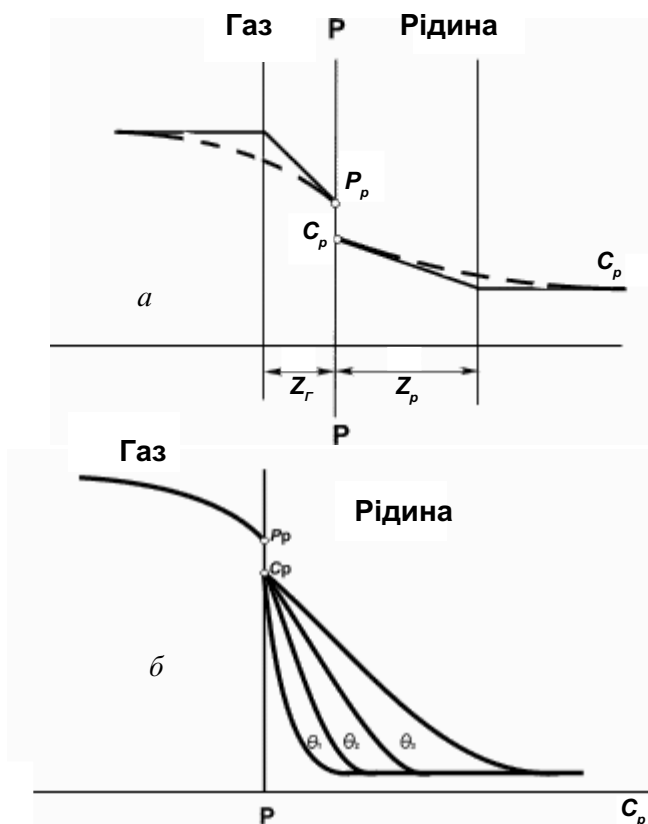


Рис.7. Розподілення концентрацій у фазах  
 а – за плівковою моделлю (суцільна лінія) та моделлю граничного дифузійного шару (пунктирна лінія); б – за моделлю оновлення ( $\theta_1 - \theta_4$ ) – послідовні профілі концентрацій у газі).

$$G = K_r F(y - y^*) = K_p F(x^* - x),$$

де  $F$  – поверхня контакту фаз;  $y$  – мольна концентрація компонента у рідкій фазі;  $K_r$ ,  $K_p$  – коефіцієнти масопередачі у газовій та рідкій фазах відповідно:

$$K_r = \frac{1}{\frac{1}{\beta_r} + \frac{m}{\beta_p}}; \quad K_p = \frac{1}{\frac{1}{\beta_p} + \frac{1}{m\beta_r}},$$

де  $\beta_r$ ,  $\beta_p$  – коефіцієнти масовіддачі у газовій та рідкій фазах відповідно;  $m = y^*/x$  – константа фазової рівноваги. Коефіцієнти масопередачі визначаються з критеріальних рівнянь виду  $Nu_D = f(Re, Pr_D, Ga)$ , де

$$Nu_D = \beta \frac{l}{D} - \text{дифузійне число Нусельта (число Шервуда Sh), } l -$$

характерний розмір,  $D$  – коефіцієнт дифузії.

Для газів, що добре розчиняються,  $m \rightarrow 0$ ,  $K_r \cong \beta_r$ , у зворотньому випадку  $K_p \cong \beta_p$ , тобто у першому випадку опір масопередачі сконцентрований на стороні газу, а у другому – рідини. Оскільки  $\beta_r \gg \beta_p$ , у системі з дифузійним опором масопередачі у газовій фазі абсорбція буде іти значно швидше.

На хід процесу можуть впливати гідродинамічні, геометричні та фізико-хімічні фактори. Вплив гідродинамічних факторів (типу апарату, гідродинамічного режиму) є досить суттєвим. Геометричні розміри поверхні контакту роблять менший, але досить значний вплив.

З фізико-хімічних факторів слід виділити фізичні властивості газу та рідини (густина, в'язкість, коефіцієнт дифузії), температуру, тиск, вібрації та пульсації, поверхневий натяг, поверхневий опір, поверхневу турбулентність тощо.

При хемосорбції швидкість процесу вища, ніж при фізичній абсорбції. Це зумовлено зменшенням концентрації компоненту, що уловлюється в рідкій фазі біля поверхні розділу внаслідок його переходу в зв'язаний стан. Прискорення процесу враховується коефіцієнтом прискорення  $\chi$ , що залежить від швидкості реакції та ступе-

ню турбулізації потоку. Тоді коефіцієнт масовіддачі при хемосорбції  $\beta'_p = \chi\beta_p$ .

Загалом, швидкість хемосорбції залежить від швидкості хімічної реакції та швидкості масопередачі між фазами. Розрізняють кінетичну область, де лімітуючою (меншою) є швидкість хімічної взаємодії та дифузійну, де лімітуючою є швидкість дифузії компонентів у зоні реакції, яка залежить від гідродинаміки та фізичних властивостей фаз і визначається аналогічно швидкості фізичної абсорбції. Дифузійно-кінетична область відповідає режимам, коли швидкості реакції та дифузії є порівняними.

Контакт газової та рідкої фази відбувається в умовах, аналогічних мокрому пилоуловлюванню. Коли газ контактує з плівкою рідини, біля поверхні розділу фаз виникають конвективні токи, які значно прискорюють масопередачу. Коефіцієнт прискорення

$$\chi_1 = 1 + 0,282 \left( \frac{d\sigma_{\text{дін}}}{dx} \right)^{3,2},$$

де  $\frac{d\sigma_{\text{дін}}}{dx}$  – градієнт сили поверхневого натягу, Па. Регенерація абсорбентів здійснюється шляхом тиску, контакту з гарячим газом (парою) або хімічної реакції.

## 4.8. Адсорбція

Адсорбція – це процес поглинання одного або кількох компонентів з газової суміші або розчину твердою речовиною – адсорбентом. Процес має селективний характер і, здебільшого, оборотний. Розрізняють фізичну адсорбцію (дивіться розд. 3.9), та хемосорбцію, коли при хімічній реакції між молекулами газу, що поглинаються та поверхневими молекулами адсорбенту утворюється хімічний зв'язок. Якщо поглинаються пари, можливе заповнення пор адсорбенту рідиною при зниженні тиску пари над угнутих під впливом сил поверхневого натягу меніском рідини у капілярах - капілярна конденсація. В деяких адсорбентах (цеолітах), до складу яких входять катіони, суттєвий вплив на процес роблять електростатичні сили.

Характер адсорбції визначається природою адсорбента, його по-

руватістю, властивостями та концентрацією адсорбтиву. Адсорбенти є поруватими матеріалами з високорозвинутою внутрішньою поверхнею, утвореною різними за розміром капілярними каналами – порами. Макропори з ефективним радіусом більшим за  $2 \cdot 10^{-7}$  м є транспортними каналами для молекул адсорбтиву. Перехідні пори з ефективним радіусом від  $1,5 \cdot 10^{-9}$  до  $2 \cdot 10^{-7}$  м можуть служити для уловлювання домішок з утворенням на своїй поверхні шару адсорбату товщиною в одну або кілька молекул – відповідно моно- та полімолекулярної адсорбції. Мікропори, менші за  $1,5 \cdot 10^{-9}$  м, як зазначалося у розд. 3.9, порівнянні за розмірами з молекулами, тому адсорбція призводить до заповнення їх об'єму. При хемосорбції на поверхні пор утворюються мономолекулярні шари.

В процесі адсорбції послідовно відбуваються стадії зовнішньої дифузії молекул адсорбтиву на зовнішню поверхню адсорбенту, внутрішньої дифузії молекул у порах до міст сорбції та власне сорбції, яка іде практично миттєво ( $10^{-8} \dots 10^{-3}$  с). Характер протікання процесу у часі залежить від того, проводиться він періодично чи безперервно. Відповідно шар адсорбенту є нерухомим або таким, що переміщується.

Процеси безперервної адсорбції аналогічні за механізмом абсорбції з деякими особливостями системи: газ – тверде тіло. Періодичні процеси мають свої специфічні закономірності, що описуються моделлю фронтального відпрацювання шару адсорбенту. Згідно з нею, за певний проміжок часу на фронтальний (лобовий) дільниці

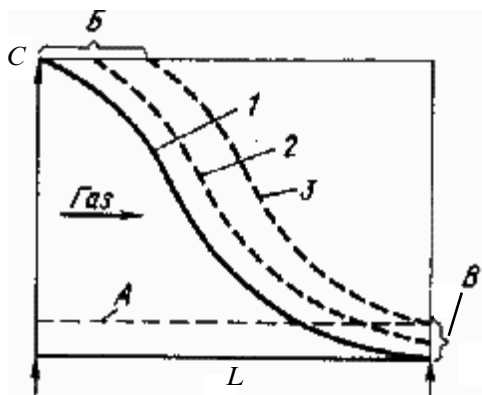


Рис.8. Масопередача при адсорбції.

Зміна фронту адсорбції з часом і по висоті шару абсорбенту:

1 – початок циклу; 2 – частково насичений абсорбент; 3 – кінець циклу; А – максимально допустима концентрація забруднювача на виході, В – сорбент, що повністю насичений, В – проскок. L – товщина шару абсорбенту; C – вхідна концентрація забруднювача.

шару адсорбенту внаслідок насичення його адсорбатом процес поглинання припиняється, і адсорбція відбувається у наступній ділянці. Оскільки швидкість масопередачі є скінченною, адсорбат розподіляється по висоті шару плавно, так що за певний проміжок часу утворюється стаціонарний фронт адсорбції, який в подальшому паралельно переміщується у напрямку газового потоку з постійною швидкістю (рис.8).

Час захисної дії шару адсорбенту  $\tau_{\text{пр}}$  завершується з "проскоком" газу з даною концентрацією компоненту, що уловлюється, наприклад, 5%, після чого концентрація домішки у газі на виході з шару адсорбенту зростає аж до стану насичення (рис. 9). Згідно з рівнянням Шилова, час захисної дії шару висотою  $L$ .

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{L}{u} - \tau_0,$$

де  $\tau_0$  – втрата часу захисної дії під впливом дифузійного опору;  $u$  – швидкість переміщення фронту абсорбції.

Процес масопередачі, враховуючи неможливість визначення поверхні контакту фаз, визначається за об'ємом зони масопередачі  $V$ :

$$G = K_{YV} V \Delta y_{\text{ср}} \tau_m,$$

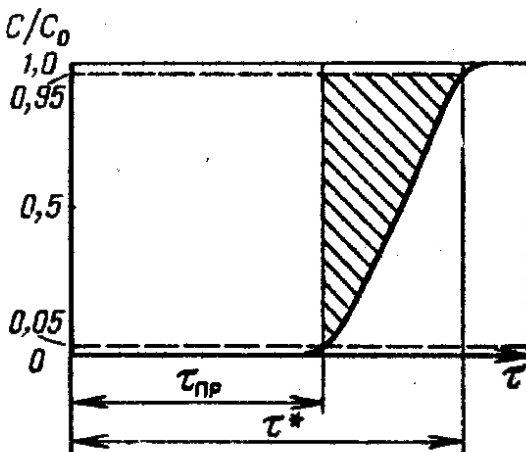


Рис.9. Вихідна крива ( $\tau_{\text{пр}}$  – час захисної дії шару;  $\tau^*$  – час досягнення рівноваги).

$$\text{де } K_{YV} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{YV}} + \frac{m}{\beta_{XV}}} -$$

об'ємний коефіцієнт масопередачі,  $\Delta y_{\text{ср}}$  – середня рушійна сила процесу;  $G$  – кількість уловленої речовини;  $\tau_m$  – час проходження фронту адсорбції по зоні масопередачі;  $\beta_{YV}$ ,  $\beta_{XV}$  – об'ємні коефіцієнти масопередачі у парогазовій та твердій фазах відповідно;  $m$  – коефіцієнт розподілу.

Вплив зовнішньої та

внутрішньої дифузії на масообмін оцінюється за дифузійним критерієм Біо,  $Bi_D = \frac{\beta_y L}{\beta_x}$ . При  $Bi_D \gg 30$  лімітуючою є швидкість дифузії у

зерні адсорбенту, а при  $Bi_D \ll 1$  – швидкість дифузії у газовій фазі. Зовнішній масообмін визначається гідродинамічним режимом течії та фізичними властивостями потоку газу і описується критеріальним рівнянням виду  $Nu_D = f(Re, Pr_D)$ . Внутрішній масообмін зворотньо залежить від величини адсорбції і не залежить від режиму течії. Оборотноість процесів адсорбції дає змогу здійснювати регенерацію адсорбентів – десорбцію шляхом нагріву адсорбенту до певної температури (термічна), пропусканням через шар адсорбенту газу, який краще сорбується, ніж адсорбат (витиснювальна) чи редукуванням тиску в системі.

#### 4.9. Іонний обмін

Іоннообмінне очищення відбувається при взаємодії розчину з твердою фазою – іонітом, при якому іони, що містяться в останній, обмінюються на іони з розчину. Іоніти, що поглинають позитивні іони, мають назву катіонітів, ті, що поглинають негативні – аніонітів, а ті, що поглинають катіони та аніони – амфотерних іонітів. До складу поглиначів входять функціональні групи, що здатні до іонізації та іонного обміну. Вони поділяються на фіксовані "анкерні", що не покидають фазу іоніту, та рівні їм і протилежні за знаком протіони, що переходять у розчин в обмін на еквівалентну кількість іонів, з нього того ж самого знаку.

Як вже зазначалося (розд.3.10), необхідною умовою для іоннообмінного очищення газів є порівняно висока вологість повітря (>60 %) та іоніту (> 20...25 % мас), що необхідно для розчинення молекул шкідливої домішки та повної гідратації та іонізації функціональних груп іонітів з утворенням гідратної оболонки. Процес іонного обміну включає стадії розчину та іонізації молекул газоподібної речовини в плівці, що огортає зерна іоніту; перенесення іонів, утворених протіонів або нейтральних молекул з плівки в глибину частинок; власне іонообмінні реакції, дифузійне перенесення протіонів іоніту до поверхні зерен; взаємодію протіонів іоніту з катіонами розчину у плівці. Інтенсифікація процесу можлива за рахунок побічних хімічних реакцій, що зміщують рівновагу сорбції у

потрібний бік. В разі нестачі вологи іоніти можуть поглинати шкідливі домішки за рахунок механізмів фізичної адсорбції з проявленням ситового ефекту.

Характеристиками іонного обміну є ізотерма іонного обміну

$$\bar{a}_i = \frac{z_i \bar{c}_i}{\sum_{i=1}^n z_i \bar{c}_i} \quad \text{та} \quad a_i = \frac{z_i c_i}{\sum_{i=1}^n z_i c_i},$$

коефіцієнт розподілення  $i$ -го іону  $K_{pi} \equiv \frac{\bar{c}_i}{a_i}$ , та вибірковість іоніту до

даного іону.  $K_{A,B} = K_{PA}/K_{PB}$ . Тут  $\bar{a}_i$  та  $a_i$  – еквівалентні долі  $i$ -го іону відповідно у фазі іоніту та у плівці;  $\bar{c}_i$ ,  $c_i$  – концентрація  $i$ -го іону в іоніті та плівці при рівновазі системи;  $z_i$  – заряд  $i$ -го іону;  $K_{PA}$ ,  $K_{PB}$  – коефіцієнти розподілення конкуруючих іонів  $A$  і  $B$ .

При значеннях  $Bi_D < 1$ , швидкість процесу визначається дифузиею іонів через плівку рідини (плівкова кінетика), а при  $Bi \gg 1$  – швидкістю дифузії іонітів у зерні (гелева кінетика). Реакція іонного обміну йде практично миттєво і не впливає на хід процесу. На швидкість зовнішньої дифузії впливають гідродинамічний режим, геометричні та фізичні властивості газу та іоніту, концентрація забруднень і коефіцієнт розподілення. Коефіцієнт зовнішньої масовіддачі визначається з рівнянь  $Nu_D = f(Re, Pr_D)$ . При плівковій кінетиці процес інтенсифікується прискоренням течії, підвищенням температури та зменшенням розміру зерна іоніту. Гелева та мішана кінетика залежить від ряду факторів, вплив яких складно врахувати (електричне поле, асоціація іонів з фіксованими іонами, неоднорідність структури зерен іоніту та зміни її у часі), тому коефіцієнти внутрішньої масовіддачі обчислюють за спрощеними напівемпіричними залежностями. Наприклад, для сферичних зерен

$$F = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{D_r \pi^2 n^2}{r_0^2}\right),$$

де  $F$  – ступінь досягнення рівноваги (відношення кількостей сорбо-

ваної речовини за час  $\tau_0$  та у момент рівноваги);  $D_r$  – коефіцієнт гелевої дифузії,  $r_0$  – радіус зерна іоніту.

Після насичення іоніти регенеруються промиванням водою, розчинами луг чи кислот, продуванням гарячим повітрям або вакуумуванням.

#### 4.10. Мембранне розділення

При мембранному розділенні газоочищення здійснюється за допомогою напівпроникних мембран, тобто таких, що пропускають тільки певні компоненти газових сумішей. В техніці знайшли застосування поруваті (товщина пор 0,005...0,03 мкм) та непоруваті або дифузійні (квазігомогенні гелі) мембрани. Вони виготовляються з полімерних матеріалів у вигляді плівок або порожнистих волокон.

Розділення з використанням поруватих мембран відбувається за механізмом кнудсенівської дифузії. Умовою проходження процесу є перевищення довжини вільного пробігу молекул над діаметром пор мембрани. Різниця у проникненні крізь пори компонентів суміші, що викликана різницею у середніх швидкостях їх молекул (зворотньо пропорційних молекулярній масі), призводить до видалення речовини з більшою молекулярною масою. На проходження процесу можуть робити негативний вплив поверхневий (конденсаційний) газовий потік, що виникає внаслідок адсорбції (конденсації) молекул на стінках пор мембрани.

При застосуванні непоруватих мембран причиною розділення є різна швидкість дифузії компонентів крізь мембрани. Процес послідовно проходить стадії сорбції газу на поверхні мембрани зі сторони суміші, яка розділяється, дифузії газу крізь мембрану та його десорбції з іншої сторони поверхні мембрани. Як правило, лімітуючою є друга стадія, для якої на основі першого закону Фіка, припускаючи, що процес аналогічний розчиненню газів у матеріалі мембрани, отримано залежність:

$$G_i = \frac{p_{1i} - p_{2i}}{\delta} A_i F,$$

де  $G_i$  – кількість  $i$ -го компоненту суміші, що пройшов крізь мембрану;  $p_{1i}$ ,  $p_{2i}$  – його парціальний тиск перед і після мембрани;  $A_i$  – коефі-

цієнт проникненості, пропорційний коефіцієнту дифузії;  $\delta$  – товщина мембрани;  $F$  – площа її поверхні.

Крім кількості домішок, що видаляються, важливою характеристикою процесу є селективність, тобто вибірковість розділення. Для дифузійних мембран цей показник є значно вищим, проте проникливість газів і парів на 2...3 порядки нижча, ніж у поруватих. Підвищення температури дозволяє збільшити питому продуктивність  $G_i$  непоруватих мембран, але зменшує селективність.

#### 4.11. Каталітичне очищення

З методів хімічного очищення відхідних газів найбільшого застосування знайшов гетерогенний каталіз (див. розділ 3.10). Процес включає стадії зовнішньої дифузії реагентів до поверхні каталізатора; внутрішньої дифузії цих речовин в порах зерен каталізатора; хемосорбції реагуючих компонентів на активних центрах поверхні каталізатора з утворенням проміжних хімічних з'єднань; хімічної

реакції; десорбції продуктів реакції та їх внутрішню дифузію до зовнішньої поверхні зерна каталізатора, а також зовнішню дифузію у ядро газового потоку.

Інтенсивність гетерогенного каталізу визначається співвідношенням швидкостей дифузійних процесів та хімічної реакції. В умовах відносно низьких температур швидкість реакції значно менша швидкості дифузії, і процес проходить у кінетичній області (область I рис.10), де інтенсивність процесу  $W$  залежить лише від природи реагуючих речовин та каталізатора:

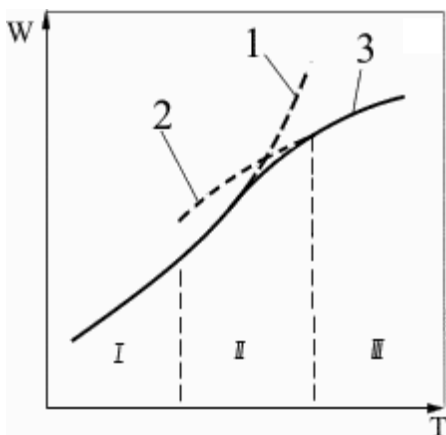


Рис.10. Залежність швидкості реакції від температури на поруватому каталізаторі:

1 – без дифузійного гальмування;  
2 – при дифузійному гальмуванні;  
3 – при взаємодії реагентів на зовнішній поверхні каталізатора.

$$W = \frac{dG_n}{d\tau} = k \Delta P P'_s \beta_n,$$

де  $k$  – константа швидкості реакції;  $dG_n/d\tau$  – кількість утворення продуктів каталізу в одини-

цю часу;  $\Delta P$  – рушійна сила процесу;  $P_g$  – безрозмірний тиск, що показує відношення робочого тиску до атмосферного;  $n$  – загальний порядок реакції;  $\beta_n$  – коефіцієнт перерахунку до нормального тиску та температури.

З підвищенням температури хімічна реакція прискорюється і процес переходить у внутрішньодифузійну область (область II, рис.10), де швидкість каталізу визначається розміром і поруватістю зерна каталізатора. Інтенсивність процесу описується другим законом Фіка:

$$W = \frac{dG}{d\tau} = -D_e \frac{d^2 c}{dz^2},$$

де  $G$  – кількість речовини, що транспортується за час  $\tau$  у напрямку  $z$ , перпендикулярному до поверхні зерна каталізатора при концентрації  $c$  цільового компонента газового потоку;  $D_e$  – коефіцієнт ефективної дифузії, що при співвідношенні довжини вільного пробігу молекули компонента  $\lambda$  до еквівалентного радіусу пори  $r_e \lambda < 2r_e$  (кнудсенівська дифузія) рівний  $D_e = \frac{2}{3} r_e \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$ , а при  $\lambda = 2r_e$

середня дифузія) рівний  $D_e = \frac{2}{3} r_e \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$ , а при  $\lambda = 2r_e$

$$D_e = D_g \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2r_e}{\lambda}\right) \right], \text{ де } D_g - \text{коефіцієнт дифузії газу.}$$

При подальшому зростанні температури різниця у швидкості реакції та інтенсивності реакції збільшується, і центральна зона поверхні каталізатора, що не працює, прогресивно зміщується до периферії зерен, так що процес відбувається переважно на поверхні останньої – зовнішньодифузійної області (область III, рис.10). Інтенсивність процесу тут визначається швидкістю підведення реагентів з газового потоку в зону реакції і знаходиться за першим законом Фіка:

$$W = \frac{\partial G}{\partial \tau} = -D_e s \frac{dc}{dz},$$

де  $s$  – вільна зовнішня поверхня зерен каталізатора.

Ефективний коефіцієнт дифузії у газовому середовищі визначається як сума коефіцієнтів молекулярної та турбулентної дифузії (див. розд. 3.4).

Окрім цих областей, існують внутрішня проміжна між кінетич-

ною та внутрішньодифузійною та зовнішня проміжна між внутрішньодифузійною та зовнішньодифузійною. Можлива також реалізація режиму передкаталізу – мономолекулярної адсорбції шкідливої речовини каталізатором при температурах, що не забезпечують його хімічну реакцію з іншим реагентом.

Зовнішньодифузійна область вважається найбільш раціональною для гетерогенного каталізу, тому що зовнішня поверхня зерен є найбільш доступною для реагентів, а низька концентрація домішок робить неістотною розігрів каталізатора. Проте, проводити процес у цій області не завжди можливо у зв'язку з великими енерговитратами.

#### 4.12. Термічне знешкодження

Сутність термічного знешкодження полягає у тепловому впливі на відхідні гази, завдяки чому відбувається окислення горючих компонентів, термічне розкладання чи відновлення шкідливих речовин, внаслідок чого утворюються або нешкідливі або менш шкідливі, ніж вихідні, речовини.

При каталітичному спаленні процес відбувається за температури, нижчої, ніж температура самозаймання горючих газів та при концентраціях останніх, що не забезпечують необхідного виділення тепла для підтримання реакції горіння. Цим способом можуть реалізуватися як процеси термокаталітичного окислення ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ,  $\text{NH}_3$  і ін.), так і процеси термокаталітичного відновлення (нітрозні гази).

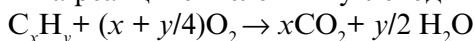
Для знешкодження особливо токсичних, канцерогенних та інших відходів, на викиди яких встановлено особливо жорсткі обмеження, може застосовуватися плазменний метод. Сутність плазмохімічної ліквідації шкідливих речовин полягає у розщепленні молекул кисню та шкідливих речовин на атоми, радикали, електрони та катіони за рахунок енергії електричної дуги при температурах вище  $4000^\circ\text{C}$ . При вистиганні у плазмі проходять реакції з утворенням  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{P}_4\text{O}_{10}$ , тому цей спосіб треба комбінувати з іншими засобами газоочищення.

Найбільшого поширення набули вогневі методи знешкодження, сутність яких полягає у спаленні горючих відходів (здатних горіти самостійно) або вогневій переробці (окисленні чи відновленні) негорючих відходів високотемпературними продуктами згоряння

палива, при якому токсичні компоненти окислюються, термічно розкладаються чи вступають у хімічні реакції з утворенням нешкідливих газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ) та твердих залишків (оксидів металів, солей). На практиці негорючі відходи часто переводять у горючі шляхом додавання до них горючих газів з високою теплоотою згоряння, застосування як окислювача кисню або повітря, забезпеченого киснем, або попереднього підігріву газу та окислювача.

Процес спалення застосовують, якщо концентрація домішок знаходиться в діапазоні між нижньою та верхньою границею окислюваності. Температура, вище якої горіння газів чи парів підтримується самочинно, називається температурою самозагоряння і залежить від типу вуглеводню і кількості тепла, що виділяється у процесі горіння, для чого потрібне додання кисню у кількості на 10...15 % більшій за стехіометричну (для каталітичного – за стехіометрією). Крім того, необхідне забезпечення інтенсивного турбулентного перемішування реагентів та часу їх перебування у зоні горіння, необхідного для повного спалення.

Основна хімічна реакція окислення вуглеводнів має вигляд:



Згідно з другим законом термодинаміки, енергія Гіббса:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S,$$

де  $\Delta H$  – ентальпія (теплота реакції) при постійному тиску,  $\Delta S$  – зміна ентропії,  $T$  – абсолютна температура.

В літературі наведено значення цих величин за стандартних умов – відповідно  $\Delta G^\circ$ ,  $\Delta H^\circ$ ,  $\Delta S^\circ$ . Самочинна реакція є термодинамічно можливою при  $\Delta G < 0$ , малоймовірною при  $0 < \Delta G < 4200$  кДж/кмоль і неможливою при  $\Delta G > 42000$  кДж/кмоль. Константа рівноваги реакції:

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}_2}^x P_{\text{H}_2\text{O}}^{y/2}}{P_{\text{C}_x\text{H}_y} P_{\text{O}_2}^{x+y/4}}, \text{ а } \Delta G = -RT \ln K_p,$$

де  $P$  – парціальні тиски речовин;  $R$  – газова стала.

Процес прямого спалення відбувається при температурах 700...800°C (каталітичного 250...400°C), тому нерідко відхідні гази перед викидом у атмосферу проходять через теплообмінник, де віддають тепло газам, що поступають на очищення, підвищуючи енергетичну ефективність процесу.

#### 4.13. Біохімічне очищення

Біохімічні методи очищення можна поділити на "сухі" та "мокрі". При сухому уловлюванні забруднені гази продуваються крізь шар біоактивної сорбуючої насадки. При цьому шкідливі речовини сорбуються або захоплюються елементами насадки, а потім транспортуються до біоактивних елементів, де і окислюються або розкладаються. При мокрому очищенні забруднюючі речовини спочатку, як при звичайній адсорбції (мокрому газоочищенні), дифундують з газу в рідину, що рухається протитечією, а потім окислюються (розкладаються) мікрофлорою у біоплівці, яка утворюється на поверхні насадки. Таким чином біохімічне очищення включає конвективну і молекулярну дифузію, дифузію крізь цитоплазматичні мембрани, та ферментативну реакцію. Дифузія крізь мембрану відбувається під впливом різниці у концентраціях речовини перед і всередині клітини або за допомогою білка - переносника, що утворює комплекс із забруднювачем, який дифундує у клітину, де розпадається, так що білок - переносник включається до нового циклу.

Швидкість ферментативних реакцій  $\frac{dx}{d\tau}$  характеризується рівнянням

$$\frac{dx}{d\tau} = \mu_m x \frac{C}{K_m + C},$$

де  $\mu_m$  – максимальна питома швидкість утилізації субстрату;  $x$  – концентрація біомаси по сухій речовині;  $K_m$  – концентрація субстрату за якої швидкість реакції складає половину від максимальної.

Вплив різних факторів (температури, антибіотиків, флокулоутворення) враховується відповідними<sup>7</sup> коригувальними коефіцієнтами. Наприклад, при наявності інгібіторів

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{\mu_m C \cdot K_i}{C \cdot K_i + K_c K_i + C^2},$$

де  $K_i$  – константа інгібірування.

Кисень, що потрібний для протікання аеробних перетворень, потрапляє до клітин тим же шляхом, що й інші гази. Враховуючи погану розчинність кисню, меншу питому поверхню та більшу товщину граничного шару навколо бульбашок газу, ніж навколо мік-

роорганізмів лімітуючим фактором у даному випадку слід визначити дифузію кисню крізь плівку рідини навколо бульбашок газу. Тож у випадку, коли швидкість біохімічного очищення визначається наявністю кисню:

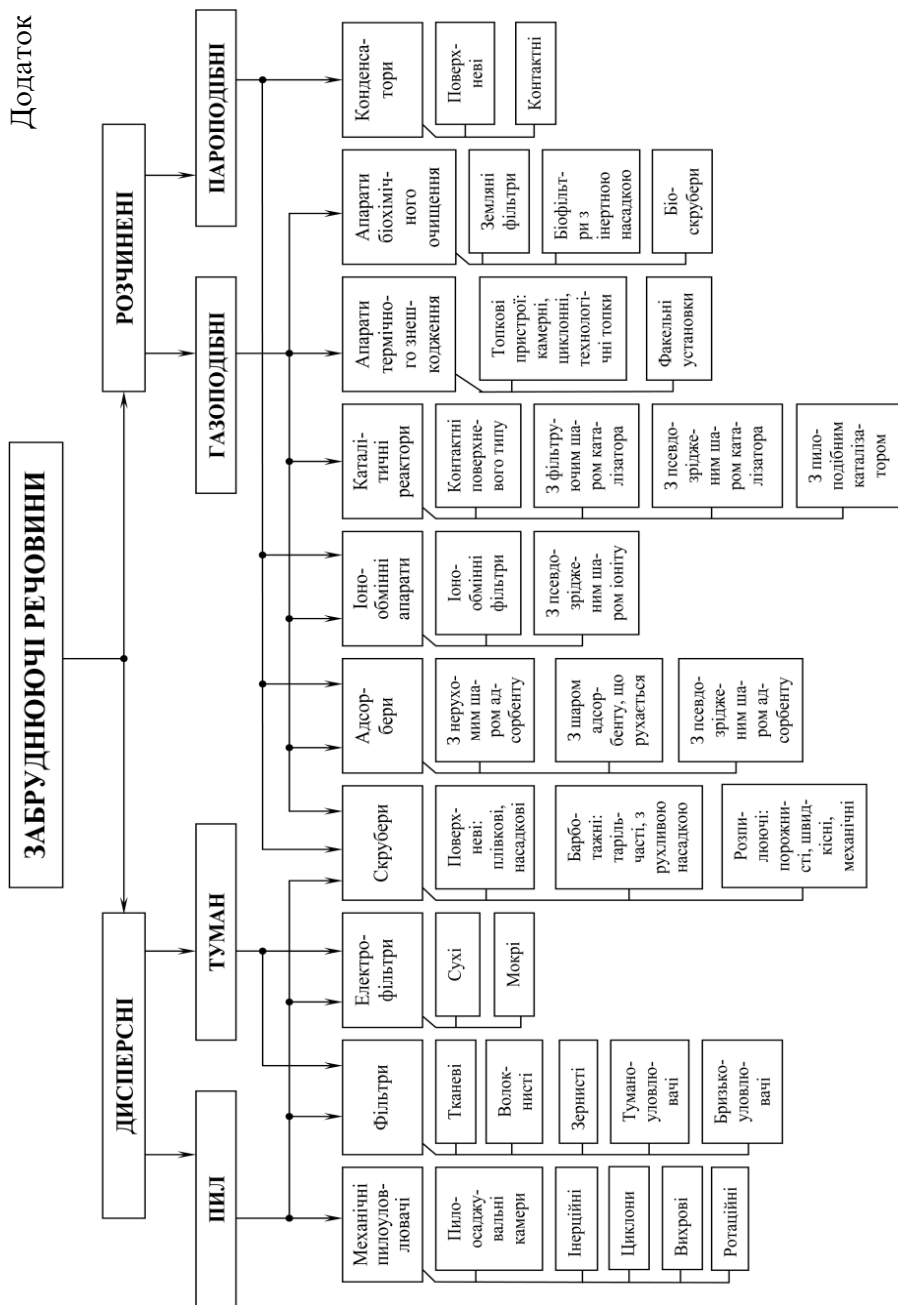
$$\frac{dx}{d\tau} = \beta_{\text{рід}} C_{\text{O}_2}^* Y_{\text{x/O}_2},$$

де  $\beta_{\text{рід}}$  – коефіцієнт масовіддачі у рідині,  $C_{\text{O}_2}^*$  – рівноважна концентрація розчинення кисню;  $Y_{\text{x/O}_2}$  – коефіцієнт виходу по кисню.

Якщо визначальним фактором буде транспортування шкідливої речовини, швидкість реакції визначається аналогічно з урахуванням лімітуючої стадії масопереносу.

## Рекомендована література

1. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. т.1. – М.: Металлургия, 1988. – 760 с.
2. Техника защиты окружающей среды. *Родионов А.И.* и др. – М.: Химия, 1989. – 512 с.
3. *Шервуд Т., Пизфорд Р., Уилки У.* Массопередача – М.: Химия, 1982. – 696 с.
4. *Райст П.* Аэрозоли – М.: Мир, 1982. – 280 с.
5. *Белоусов В.В.* Теоретические основы процессов газоочистки – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
6. *Пирумов А.И.* Обеспыливание воздуха – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
7. *Ужов В.Н., Мягков Б.И.* Очистка промышленных газов фильтрами. – М.: Химия, 1972. – 248 с.
8. *Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю.* Очистка газов мокрыми фильтрами. – М.: Химия, 1972. – 248 с.
9. *Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю.* Подготовка промышленных газов к очистке – М.: Химия, 1975. – 216 с.
10. *Страус В.* Промышленная очистка газов – М.: Химия, 1981. – 616 с.
11. *Балабеков О.С. Балтабаев Л.Ш.* Очистка газов в химической промышленности. – М.: Химия, 1991. – с.
12. *Рамм В.М.* Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
13. *Серпионова Е.Н.* Промышленная адсорбция газов и паров. – М.: Высшая школа, 1969. – 416 с.
14. *Аширов А.* Ионнообменная очистка сточных вод, растворов и газов – Л.: Химия, 1983. – 295 с.
15. *Власенко В.М.* Каталитическая очистка газов. – К.: Техника, 1973. – 199 с.
16. *Бернардинер М.Н., Шурыгин А.П.* Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. – М.: Химия, 1990. – 304 с.
17. Экологическая биотехнология – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
18. *Дытнерский Ю.И.* Процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн. – М.: Химия, 1995. – 368 с.
19. Мембранная технология в решении экологических проблем газовой промышленности – М.: Недра, 1997. – 227 с.



## Зміст

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                     | 3  |
| 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАБРУДНЕНЬ АТМОСФЕРИ .....                                    | 4  |
| 2. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ І ЗАСОБІВ<br>ГАЗООЧИЩЕННЯ І ПИЛОУЛОВЛЮВАННЯ ..... | 5  |
| 3. МЕХАНІЗМИ ГАЗООЧИЩЕННЯ ТА<br>ПИЛОУЛОВЛЮВАННЯ .....                           | 6  |
| 3.1. Гравітаційне осадження .....                                               | 6  |
| 3.2. Інерційне осадження .....                                                  | 7  |
| 3.3. Дотик .....                                                                | 9  |
| 3.4. Дифузія .....                                                              | 10 |
| 3.5. Осадження в полі дії електричних сил .....                                 | 15 |
| 3.6. Магнітне уловлювання .....                                                 | 16 |
| 3.7. Коагуляція .....                                                           | 16 |
| 3.8. Конденсація .....                                                          | 18 |
| 3.9. Фізична адсорбція .....                                                    | 20 |
| 3.10. Хімічна реакція .....                                                     | 23 |
| 3.11. Біохімічні реакції .....                                                  | 24 |
| 4. ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ У ГАЗООЧИЩЕННІ ТА<br>ПИЛОУЛОВЛЮВАННІ .....                   | 26 |
| 4.1. Механічне пилоуловлювання .....                                            | 27 |
| 4.2. Фільтрування .....                                                         | 27 |
| 4.3. Мокре пилоуловлювання .....                                                | 30 |
| 4.4. Електростатичне осадження .....                                            | 32 |
| 4.5. Магнітна фільтрація .....                                                  | 34 |
| 4.6. Теплові процеси .....                                                      | 35 |
| 4.7. Абсорбція .....                                                            | 36 |
| 4.8. Адсорбція .....                                                            | 40 |
| 4.9. Іонний обмін .....                                                         | 43 |
| 4.10. Мембранне розділення .....                                                | 45 |
| 4.11. Каталітичне очищення .....                                                | 46 |
| 4.12. Термічне знешкодження .....                                               | 48 |
| 4.13. Біохімічне очищення .....                                                 | 49 |
| Рекомендована література .....                                                  | 52 |
| Додаток .....                                                                   | 53 |

Сергій Сергійович РИЖКОВ  
Юрій Миколайович ХАРИТОНОВ  
Володимир Валентинович БЛАГОДАТНИЙ

## **МЕТОДИ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД ЗАБРУДНЕНЬ**

Видавництво УДМТУ, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного  
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції  
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

---

Комп'ютерна правка і верстка М.Г. Мозговий

---

Підписано до друку 06.11.02. Формат 60×84/16. Папір офсетний.  
Умов. друк. арк. 3,1. Обл.-вид. арк. 3,4. Тираж 100 прим. Вид. № 43.  
Зам. № 347. Ціна договірна.



ВИДАВНИЦТВО УКРАЇНСЬКОГО  
ДЕРЖАВНОГО МОРСЬКОГО  
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ



---

---

### *Шановні панове!*

Запрошуємо вас ознайомитись з можливостями книжкового видавництва, висококваліфіковані спеціалісти якого дозволяють оперативно і якісно виконати замовлення будь-якого рівня складності.

Наш головний принцип – задовольнити потреби замовника у повному комплексі поліграфічних послуг, починаючи з розробки та підготовки оригінал-макету, що виконується на базі IBM PC, і закінчуючи друком на офсетних машинах.

Крім цього, ми маємо повний комплекс післядрукарського обладнання, що дає можливість виконувати:

- ✓ листопідбір;
- ✓ брошурування на скобу, клей;
- ✓ порізка на гільйотинах;
- ✓ ламінування.

Видавництво також оснащено сучасним цифровим дублюкатором фірми "Duplo" формату А3, що дає можливість тиражувати зі швидкістю до 130 копій за хвилину.

Для постійних клієнтів – гнучка система знижок.

Отже, якщо вам потрібно надрукувати **підручники, книги, брошури, журнали, каталоги, рекламні листівки, прайс-листи, бланки, візитні картки**, – ми до ваших послуг.

---

---

© Український державний морський технічний університет

✉ Україна, 54002, м.Миколаїв, вул.Скороходова, 5,

видавництво УДМТУ

☎ 8(0512) 37-33-42; 39-81-46, 39-73-39, fax 8(0512) 39-73-26;

E-mail: publishing@usmtu.edu.ua