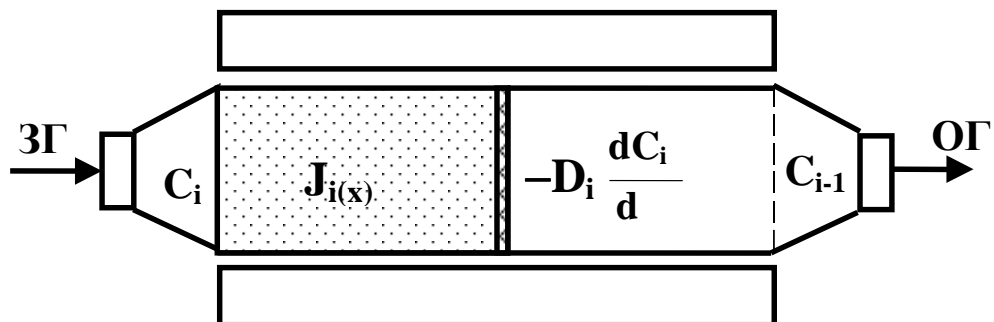


Г.С. Ратушняк

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ  
ТЕХНОЛОГІЇ  
ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький державний технічний університет

**Г.С. Ратушняк**

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ  
ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ**

Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів спеціальності “Тепло-газопостачання та вентиляція”. Протокол № 6 від 31 січня 2002 р.

Вінниця ВДТУ 2002

УДК 66.074  
Р 25

**Рецензенти:**

*Друкований М.Ф.*, доктор технічних наук, професор (ВДТУ)

*Пономарчук А.Ф.*, доктор технічних наук, професор (ВДТУ)

*Зінич П.Л.*, кандидат технічних наук, (КНУБА)

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Ратушняк Г.С.**

**Р 25 Теоретичні основи технології очищення газових викидів**

*/Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. - 96 с.*

Наведені головні типи забруднювачів, їх властивості та класифікація. Характеризуються фізичні процеси в атмосфері, що впливають на характер розповсюдження газових викидів. Викладені фізичні основи технології очищення газів від пилу. Розглянуті теоретичні основи технології очищення газових викидів від газо- й пароподібних забруднень абсорбційним та адсорбційним методами. Розкривається теоретична суть електричного, магнітного й каталітичного очищення газових викидів та їх термічного знешкодження.

Матеріал посібника може бути корисним спеціалістам, що займаються проектуванням, будівництвом й експлуатацією споруд з очищення газових викидів.

УДК 66.074

© Г.С. Ратушняк, 2002

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький державний технічний університет

**Г.С. Ратушняк**

## **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ**

Усі цитати, цифровий, фактичний матеріал та бібліографічні відомості перевірені, написання одиниць відповідає стандартам. Зауваження рецензентів враховані.

Автор: \_\_\_\_\_ Г.С. Ратушняк  
(підпис)

Вимогам, які висуваються до навальної літератури, відповідає.

До друку і в світ дозволяю на підставі § 2 п.15 “Єдиних правил...”

Проректор з навчальної та науково-методичної роботи  
В.О. Леонтєв

Затверджено  
на засіданні кафедри ТЕГІЗБ  
Протокол № 8 від 25.12.2001 р.  
Зав. кафедрою

\_\_\_\_\_ С.Й. Ткаченко  
(підпис)

Вінниця ВДТУ 2002

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Ратушняк Георгій Сергійович – професор кафедри теплоенергетики, газопостачання та інженерного забезпечення будівництва, кандидат технічних наук, є автором понад 180 опублікованих наукових та навчально-методичних робіт, в тому числі 22 винаходів. На основі 30-річного науково-педагогічного досвіду підготував і опублікував 45 навчально-методичних посібників, серед яких 8 навчальних посібників для студентів вузів будівельних спеціальностей.

Наукові інтереси Ратушняка Г.С. направлені на розробку енерго- й ресурсозберігаючих технологій, методологій й технічних засобів по раціональному використанню природного середовища в результаті антропогенної діяльності. Займається вирішенням проблеми педагогіки, що пов'язана з активізацією пізнавальної діяльності студентів шляхом впровадження прогресивних технологій навчання. Лауреат першої міністерської премії “За досягнення в навчально-виховній та науково-педагогічній роботі” та обласної педагогічної премії. Є дійсним членом Академії будівництва України, професором Міжнародної Кадрової Академії.

## ЗМІСТ

Передмова .....	5
1 Забруднюючі речовини, їх типи та властивості .....	7
1.1 Джерела забруднюючих речовин та їх класифікація .....	7
1.2 Основні властивості пилу .....	8
1.3 Основні властивості газів .....	11
1.4 Радіоактивні забруднювачі .....	13
2 Фізичні процеси в атмосфері .....	17
2.1 Основні фізичні параметри стану атмосфери і метеорологічні елементи .....	17
2.2 Радіаційні процеси в атмосфері .....	18
2.3 Тепловий режим атмосфери .....	21
2.4 Водяна пара в атмосфері .....	23
2.5 Атмосферний тиск .....	25
2.6 Рухи атмосферного повітря .....	27
2.7 Перенесення забруднювачів в атмосфері .....	29
3 Фізичні основи технології очищення газів від пилу .....	31
3.1 Фізичні основи технологічних процесів пиловловлення .....	31
3.2 Гравітаційне осадження частинок .....	32
3.3 Інерційне осадження частинок .....	34
3.4 Відцентрове осадження частинок .....	37
3.5 Дифузійне осадження частинок .....	39
3.6 Очищення частинок за рахунок зачеплення .....	41
3.7 Ефективність очищення газів від пилу .....	42
3.8 Технологічне обладнання для очищення газів від пилу .....	44
4 Фізико-хімічні основи очищення газів від газо- й пароподібних забруднень абсорбційним методом .....	47
4.1 Суть абсорбційного методу очищення газових викидів .....	47
4.2 Рівновага в системі газ-рідина .....	48
4.3 Кінетика процесу абсорбції .....	51
4.4 Технологічне обладнання для абсорбційного очищення газових викидів .....	56
5 Фізико-хімічні основи очищення газів від газо- й пароподібних забруднень адсорбційним методом .....	61
5.1 Суть адсорбційного методу очищення газових викидів .....	61
5.2 Рівновага й швидкість адсорбції .....	62
5.3 Характеристика адсорбентів .....	65
5.4 Технологічне обладнання для адсорбційного очищення	

газів від газо- й пароподібних забруднень .....	69
6 Фізико-хімічні основи каталітичного очищення газових викидів .....	72
6.1 Суть каталітичного методу очищення газових викидів .....	72
6.2 Характеристика каталізаторів .....	75
6.3 Технологічне обладнання для каталітичного очищення газових викидів .....	77
7 Фізичні основи термічного знешкодження паро-газових викидів .....	80
7.1 Суть термічного знешкодження паро-газових викидів .....	80
7.2 Технологічне обладнання для знешкодження паро-газових викидів в топкових пристроях .....	81
7.3 Технологічне обладнання для знешкодження паро-газових викидів в факельних пристроях .....	83
8 Фізичні основи електричного та магнітного очищення газових викидів .....	85
8.1 Суть електричного методу очищення газових викидів .....	85
8.2 Технологічне обладнання для електричного очищення газових викидів .....	89
8.3 Суть магнітного методу очищення газових викидів .....	91
8.4 Технологічне обладнання для магнітного очищення газових викидів .....	92
Література .....	94

## ПЕРЕДМОВА

Розвиток людської цивілізації неможливий без раціональної взаємодії з природою. Цілеспрямовані антропогенні дії на природу зумовлюють не тільки позитивний вплив, але й призводять до негативних наслідків. Антропогенна міграція хімічних елементів стала основним фактором зміни навколишнього середовища. Надходження хімічних елементів в навколишнє середовище більше ніж у 100 разів перевищує природний процес.

В зв'язку із збільшенням виробництва електроенергії, добування й переробки нафти, газу й вугілля, виробництва металів, цементу, добрив та інших продуктів хімічної промисловості дуже швидкими темпами забруднюється атмосфера. Щорічно в світі спалюється 7 млрд. т умовного палива. Це спричиняє викиди в атмосферу близько 1 млрд. т різних речовин, серед яких багато канцерогенних. За останні 100 років в атмосферу потрапило 1 млн. т кремнію; 1,5 млн. т миш'яку; 0,9 млн. т кобальту та багато інших шкідливих речовин. Зараз в атмосфері знаходиться майже 20 млн. т зважених частинок. При спалюванні палива звільняється значна кількість теплоти, яка розсіюється в навколишньому середовищі і суттєво змінює температурний режим та динаміку процесів, що протікають в атмосфері. Найефективнішим методом захисту повітряного басейну від забруднення шкідливими речовинами є впровадження перспективних безвідходних ресурсо- й енергозберігаючих технологічних процесів з замкнутими виробничими циклами. Такі технології дозволяють виключити або суттєво знизити викиди шкідливих речовин в атмосферу. Але це не завжди технологічно можливо й економічно доцільно. Тому для більшості підприємств очищення газів є одним із заходів з захисту атмосферного повітря від забруднення.

Значна різноманітність джерел забруднювачів атмосферного повітря, що відрізняються за природою й концентрацією шкідливих речовин, температурою, тиском, періодичністю й часом викиду, визначає вибір раціонального обладнання для очищення газових викидів. В залежності від типу забруднювачів та їх фізико-хімічних властивостей використовують різні методи осадження твердих частинок, абсорбційне та адсорбційне очищення газів від паро- й газоподібних забруднень, каталітичне, термічне, електричне та магнітне очищення газових викидів. Доцільність вибраного методу повинна бути економічно обґрунтованою.

Проблема якісної підготовки фахівців з теплогазопостачання й вентиляції для спеціалізованих проектних, будівельно-монтажних й експлуатаційних організацій знаходиться в тісному взаємозв'язку з отриманням ними знань щодо вибору раціонального обладнання для очищення газових викидів. Вирішення цієї задачі вимагає відповідного методичного забезпечення навчального процесу, яке б дозволяло отримувати навички й уміння вирішувати складні інженерно-технічні задачі з захисту навколишнього



середовища від негативних наслідків антропогенної дії на нього.

В навчальному посібнику наведена характеристика основних забруднювачів та фізичні процеси в атмосфері, що визначають характер розповсюдження забруднення навколишнього середовища газовими викидами. Викладені основні теоретичні положення очищення газів від пилу. Розглядаються фізико-хімічні основи очищення газів від газо- й пароподібних забруднень абсорбційним та адсорбційним методами. Розкривається суть каталітичного, термічного, електричного й магнітного методів очищення газових викидів. При викладенні матеріалу навчального посібника використані результати наукових досліджень та практичний досвід проектування й експлуатації технологічного обладнання для захисту атмосферного повітря від забруднення.

Матеріал посібника враховує специфіку програм дисциплін, що викладаються при підготовці фахівців зі спеціальності “Теплогазопостачання й вентиляція” й призначений активізувати самостійну роботу студентів. В зв'язку з цим окремі теоретичні положення мають специфічну методику викладання, яка роз'яснює теорію та суть питань, що розглядаються.

Автор, професор Міжнародної Кадрової Академії та академік Академії будівництва України, лауреат першої міністерської премії “За досягнення в навчально-виховній та науково-педагогічній роботі”, наукові інтереси якого направлені на розробку енерго- й ресурсозберігаючих технологій, методології та технічних засобів з раціонального використання природного середовища в результаті антропогенної діяльності, при написанні навчального посібника враховував досвід підготовки інженерів-будівельників зі спеціальності “Теплогазопостачання й вентиляція” у Вінницькому державному технічному університеті та в інших провідних вищих навчальних закладах.

Автор щиро вдячний рецензентам за поради та зауваження, врахування яких сприяло покращанню змісту навчального посібника, а також співробітникам обчислювального центру Гвардіян С.І. та Франишиній Т.О. за комп'ютерний набір та верстку.

# 1 ЗАБРУДНЮЮЧІ РЕЧОВИНИ, ЇХ ТИПИ ТА ВЛАСТИВОСТІ

## 1.1 Джерела забруднюючих речовин та їх класифікація

Природне та антропогенне забруднення атмосфери поділяється на фізичне (пил), хімічне, звукове (шум), біологічне, теплове та радіоактивне. За агрегатним станом забруднювачі бувають тверді, рідкі та газоподібні:

Джерела шкідливих викидів класифікують за такими ознаками:

- потужність (потужні, великі, малі);
- висота (високі, середні, низькі);
- розміщення (одиначні, лінійні);
- температура (нагріті, холодні);
- розповсюдження (внутрішнє, зовнішнє).

До потужних джерел забруднення належать металургійна та хімічна промисловість й теплоелектроцентралі. Великими забруднювачами є підприємства будівельної індустрії. Малими за потужністю джерелами забруднення є районні опалювальні котельні, що працюють на твердому й рідкому паливі, та місцева промисловість.

Високими вважаються джерела забруднення, з яких шкідливі речовини викидаються на висоту, що рівна або перевищує границю низьких викидів для даної циркуляційної зони і не забруднює її. Ця висота становить більше 50 м.

До низьких належать джерела забруднення з висотою гирла над землею поверхнею 2...10 м, шкідливі речовини від яких забруднюють підвітряну й навітряну зони широкої споруди. Верхня границя викидів шкідливих речовин низьких джерел, що розміщені на покрівлі, залежить від висоти будівлі та відстані від джерела в межах покрівлі до навітряної сторони будівлі.

Середні за висотою джерела забруднення мають висоту 10...50 м.

Одиначними джерелами забруднення є труби, шахти й вентилятори на покрівлі, факели розповсюдження забруднюючих речовин яких не накладаються один на одного в межах половини завітряної або єдиної циркуляційної зони чи в межах між корпусної циркуляційної зони.

Лінійними джерелами є джерела, що мають значну протяжність в напрямку, який перпендикулярний вітру (аераційні ліхтарі, відкриті віконні прорізи тощо), а також близько розміщені одиначні джерела, факели розповсюдження шкідливих речовин яких накладаються один на одного.

До нагрітих джерел забруднення відносяться викиди з температурою вищою за 50°C, а до холодних – що мають температуру нижчу за 50°C.

Класифікація атмосферних забруднень газових викидів за розмірами наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 - Класифікація атмосферних забруднень за розмірами

Назва атмосферних забруднень	Розміри
Зола	Великі частинки розміром більше 76 мкм
Пил	Частинки розміром менше 76 мкм
Дим	Тверді частинки менше 1 мкм
Туман	Рідкі частинки менше 10 мкм
Імла	Досить густі тумани, що сильно погіршують видимість
Кіптява	Летка зола, продукти неповного згорання або обидва види цих забруднень
Сажа	Злиплі частинки незгорівшого вугілля, які утворюються при його неповному згоранні
Аерозолі	Будь-які суспензії в повітрі, що відносно стабільні
Смог	Назва будь-якого небажаного забруднення атмосфери (густий туман з пилом та шкідливим газом)

## 1.2 Основні властивості пилу

Для вибору відповідного обладнання й технології очищення газових викидів від пилу необхідно знати фізико-хімічні властивості пилу, початкову концентрацію пилу та ефективність очищення. Домінантними при цьому є параметри пилу, що знаходиться в газових викидах.

Пил характеризується такими параметрами: густина, дисперсність, адгезія, сипучість, абразивність, змочуваність, гігроскопічність, електрична провідність й зарядженість частинок, самозагоряння й утворення вибухових сумішей.

Густина ( $\text{кг/м}^3$ ;  $\text{г/см}^3$ ) - кількість маси речовини в одиниці об'єму. Розрізняють дійсну, уявну та насипну густину. Насипна густина на відміну від дійсної враховує повітряний прошарок між частинками пилу. При злежуванні насипна густина збільшується в 1,2...1,5 рази. Уявна густина є відношенням маси частинок до об'єму, який вона займає, включаючи пори, порожнечу й нерівності.

Дисперсність (мкм) - характеристика розміру частинок. Діапазон дисперсності характеризують найбільшим й найменшим розміром. Для характеристики дисперсного складу пилу розбивають всю масу пилинок на деякі фракції, обмежені частинками визначеного розміру з вказанням, яку частку у відсотках від маси або кількості частинок вони складають. Дис-

персний склад пилу зображують у вигляді інтегральних кривих, що в більшості випадків описуються нормально-логіфімічним законом розподілення частинок за розмірами. Дисперсність пилу характеризується параметрами:  $d_{50}$ , що дає середній розмір частинок;  $lg \sigma$  - ступінь полідисперсності пилу. Дисперсний склад пилу, що утворюється при деяких технологічних процесах, наведено в табл. 1.2, а його класифікація за дисперсністю - в табл. 1.3.

Таблиця 1.2 - Дисперсний склад пилу, що утворюється при деяких технологічних процесах

Технологічний процес	Вид пилу	$d_{50}$ , мкм	$lg \sigma$
Розмелювання цементного клінкеру в кульовому млині	цемент	20	0,47
Розпилювальна сушарка при виробництві суперфосфату	суперфосфат	80	0,21
Заточка інструменту	метал, абразив	38	0,21

Адгезія - властивість частинок, що характеризує їх схильність до злипання. Чим менший розмір частинок пилу, тим легше вони злипаються. Пил, у якого 60-70% частинок мають діаметр менше 10 мкм, веде себе як злиплий. Класифікація пилу за злипанням наведена в табл. 1.4.

Таблиця 1.3 - Класифікація пилу за дисперсністю

Група	Назва пилу	$d_{50}$ , мкм
I	дуже великодисперсний	> 140
II	великодисперсний	40...140
III	середньодисперсний	10...40
IV	дрібnodисперсний	1...10
V	дуже дрібнодисперсний	< 1

Сипучість - кут природного скосу, що його приймає пил в свіжонасипному вигляді.

Абразивність частинок характеризує інтенсивність зношування металу при однакових швидкостях газів й концентраціях пилу. Величина абразивності залежить від твердості, форми, розміру й густини частинок. Максимальне зношування металів буде при розмірах  $90 \pm 2$  мкм.

Змочуваність частинок характеризує інтенсивність покриття їх поверхні рідиною. Гладенькі частинки змочуються краще, ніж частинки з нерівною поверхнею, оскільки вони більшою мірою покриті абсорбованою газовою оболонкою, що утрудняє змочування. Класифікація твердих тіл за характером змочування наведена в табл. 1.5.

Гігроскопічність частинок - це здатність пилу всмоктувати вологу. Залежить від хімічного складу, розміру, форми й ступеня шорсткості поверхні частинок.

Таблиця 1.4 - **Класифікація пилу за злипанням**

Група злипання	Найменування золи й пилу	Розривна міцність за Є.І. Андріановим, Па
Незлипні	Шлаковий, глиноземний, доломітовий, шамотний	$P \leq 60$
Слабозлипні	Летка зола при шаровому спалюванні, з недопаленням більше 30% кам'яного вугілля, коксовий пил, сланцева зола, магnezитовий пил	$60 < P < 300$
Середньозлипні	Летка без недопалення та торф'яна зола, пил оксиду цинку, свинцю й олова, сухий цемент	$300 < P < 600$
Сильнозлипні	Вологовмістний цементний пил, гіпсовий та алебастровий пил, пил глини, каліну, мучнистий пил, волокнистий, азбестовий, бавовняний та шерстяний пил	$P > 600$

Таблиця 1.5 - **Класифікація твердих тіл за характером змочування**

Група	Характер змочування	Найменування тіл
Гідрофільні	Добре змочувані	Кальцій, кварц, силікати, окислені мінерали
Гідрофобні	Погано змочувані	Графіт, вугілля, сірка
Абсолютно гідрофобні	Майже незмочувані	Парафін, тефлон, бітум

Електрична провідність частинок характеризується питомим електричним опором шару пилу (Ом-см). Залежить від поверхневої і внутрішньої електропровідності, форми й розмірів частинок а також від структури шару й параметрів газового потоку. Класифікація пилу за питомим електричним опором наведена в табл. 1.6.

Електрична зарядженість частинок та її знак залежать від способу їх утворення, хімічного складу, від властивостей речовин, з якими вони стикаються. Вона впливає на вибухонебезпечність й адгезійні властивості та на поведінку частинок в газоходах й пиловловлювачих апаратах.

Самозагорання й утворення вибухонебезпечних сумішей частинок з повітрям залежить від хімічних й термічних властивостей пилу, від розмірів та форми частинок, їх концентрації в повітрі, від вологовмісту й складу газів, розмірів та джерела запалення й відносного вмісту інертного пилу.

Хорошу здатність до самоzapалення мають пили органічних речовин, що утворюються при виготовленні барвників, пластмас й волокон, а також пил таких металів, як магнію, алюмінію й цинку.

Таблиця 1.6 - **Класифікація пилу за питомим електричним опором**

Група пилу	Питомий електричний опір, Ом·см	Відношення до електрофільтрів
Низькоомний	$10^4$	на електроді миттю розряджається, можливий вторинний винос
Середньоомний	$10^4 - 10^{10}$	на електроді розрядка проходить повільно, добре вловлюється
Високоомний	$10^{10} - 10^{13}$	на електроді утворюють пористий ізолюючий шар, великі труднощі при вловлюванні

Мінімальні вибухонебезпечні концентрації завислого в повітрі пилу складають 20...50 г/м<sup>3</sup>, а максимальні - 700-800 г/м<sup>3</sup>. Ймовірність вибуху та його сила тим більші, чим більший вміст кисню в газовій суміші. Якщо концентрація кисню менше 16%, вибух пилової хмари не відбудеться.

### 1.3 Основні властивості газів

Гази характеризуються такими основними параметрами, як молекулярна маса, густина, в'язкість, вологість, питома теплоємність та ентальпія. Основні фізичні властивості деяких газів наведені в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 - **Основні фізичні властивості газів**

Газ	Молекулярна маса, М кг/кмоль	Густина, кг/м <sup>3</sup>	В'язкість, 10 <sup>-6</sup> Па·с	Питома теплоємність, МПа кДж
Азот	28,02	1,25	17	1,04
Ацетилен	26,04	1,171	9,35	1,68
Бутан	58,12	2,67	8,1	1,91
Водень	2,02	0,09	8,42	1,42
Діоксид вуглецю	44,01	1,98	13,7	0,84
Діоксид сірки	64,07	2,93	11,7	0,63
Кисень	32,0	1,43	20,3	0,91
Оксид вуглецю	28,01	1,25	16,6	1,05
Повітря	28,95	1,29	17,3	1,01
Пропан	44,1	2,02	-	!89
Хлор	70,91	3,22	-	0,48
Етилен	28,05	1,26	9,85	1,53

Питома теплоємність газів - кількість теплоти, яку необхідно надати одиниці кількості газу для нагрівання на 1°C. Вона залежить від тиску і об'єму.

Ентальпія газів - кількість теплоти, яку необхідно підвести до 1 кг газу при постійному тиску, щоб довести його температуру від 0°C до заданого значення температури.

Значна частка шкідливих викидів в атмосферу формується при спалюванні твердого та рідкого палива й газу котельнями та теплоелектроцентральними. Суттєва частка у забрудненні атмосферного басейну населених пунктів належить автотранспорту. Найбільш поширені шкідливі викиди: оксиди вуглецю, оксиди азоту, діоксид сірки, сірководень та канцерогенні речовини.

Оксид вуглецю (**CO**) – це газ з молекулярною масою  $M_{CO} = 28,01$  кг/кмоль та густиною  $\gamma_{CO} = 1,25$  кг/м<sup>3</sup>, не має кольору та запаху. Він утворюється при неповному спалюванні всіх видів палива. Погано розчиняється у воді і не поглинається активованим вугіллем. В зв'язку з тим, що його густина рівна густині повітря, він рівномірно розповсюджується в повітрі приміщень. Оксид вуглецю є отруйним газом, оскільки він порушує постачання кисню до людського організму.

Оксиди азоту (**NO**, **NO<sub>2</sub>**) – це газів відповідно з молекулярною масою  $M_{NO} = 30$  кг/кмоль та  $M_{NO_2} = 46$  кг/кмоль й густиною  $\gamma_{NO} = 1,34$  кг/м<sup>3</sup> та  $\gamma_{NO_2} = 2,05$  кг/м<sup>3</sup>. Оксиди азоту мають червоно-бурий колір і є сильно отруйними газами. При концентрації до 3 мг/м<sup>3</sup> запах не відчувається, а при концентрації 10 мг/м<sup>3</sup> відчувається слабкий запах, який стає відчутним при концентрації більше 15 мг/м<sup>3</sup>, що викликає подразнення очей. Оксиди азоту є отруйними газами і більш шкідливі, ніж оксид вуглецю. Вони також є причиною корозії металів.

Якщо в повітрі міститься значна кількість оксидів вуглецю й оксидів азоту, то під дією сонячної радіації утворюється токсичний туман. Цей туман зменшує прозорість атмосфери. В результаті збільшується поглинання ультрафіолетового проміння, що має бактерицидні властивості.

Діоксид сірки (**SO<sub>2</sub>**) – це газ з молекулярною масою  $M_{SO_2} = 64,07$  кг/кмоль та густиною  $\gamma_{SO_2} = 2,93$  кг/м<sup>3</sup>, не має кольору, легко стискується і має гострий запах. Запах починають відчувати при концентрації 0,006 мг/л. При концентрації 0,05 мг/л спостерігається подразнення очей та кашель і концентрація шкідлива протягом 30...40 хвилин. Концентрацію 0,3 мг/л людина може витримати тільки протягом однієї хвилини. Діоксид сірки є агресивним агентом корозії.

Сірководень (**H<sub>2</sub>S**) – це газ з молекулярною масою  $M_{H_2S} = 34$  кг/кмоль та густиною  $\gamma_{H_2S} = 1,54$  кг/м<sup>3</sup>, не має кольору, але має сильний неприємний

запах, що аналогічний запаху тухлих яєць. Сірководень міститься в складі більшості неочищених штучних газів: коксовому, сланцевому та газів переробки нафти, а також, в незначній кількості, в природних газах. Це газ, який має сильну нервову дію. Сильне отруєння настає уже через одну годину перебування в атмосфері з вмістом 0,05...0,07% сірководню. При менших концентраціях спостерігається подразнення очей та органів дихання. Людина починає відчувати наявність сірководню в повітрі при концентрації біля 0,002 мг/л. При значних концентраціях його запах стає меншим і менш неприємним. В вологому середовищі сірководень є агресивним агентом корозії. Коли він потрапляє в ґрунт, то зменшує його родючість та забруднює ґрунтові води.

Найбільш розповсюдженим й сильно дійним канцерогеном є 3,4-бензпірен ( $C_2H_{12}$ ) з молекулярною масою  $M_{C_2H_{12}} = 252$  кг/кмоль. Це тверда речовина у вигляді голочкоподібних жовтих кристалів, яка розчиняється в органічних розчинах (ефір, спирт, бензол тощо). Джерелами потрапляння його в атмосферу є промислові випадки, які утворюються при неповному спалюванні палива, та вихлопні гази двигунів автомобільного транспорту. 3,4-бензпірен є речовина, що викликає онкологічні захворювання легень та інших органів. Його концентрація в атмосферному повітрі збільшується взимку в зв'язку з різким збільшенням кількості димових викидів опалювальних систем.

#### 1.4 Радіоактивні забруднювачі

Радіоактивне забруднення атмосферного повітря відбувається внаслідок випробування ядерної зброї, видобування й переробки уранових руд, складування радіоактивних відходів, аварій на атомних електростанціях тощо.

Внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС загальна площа радіаційного забруднення становить 143 млн. га, на якій проживає біля 2 млн. людей. Більше 20 тис. населення проживає на території, де радіаційне забруднення лише нуклідами цезію перевищує  $40$  Ки/км<sup>2</sup>.

Тривалість існування радіоактивних нуклідів характеризується радіоактивними сталими розпаду ( $\lambda$ ) і періодами піврозпаду ( $T_{1/2}$ ). Періоди піврозпаду для різних нуклідів змінюються від  $10^{-6}$  с до  $10^{10}$  років. Співвідношення між середньою тривалістю існування нукліда ( $T_{cp}$ ) і радіоактивною сталою розпаду таке

$$T_{cp} = 1/\lambda = 1,44 T_{1/2} . \quad (1.1)$$

Одиницею активності радіоактивної речовини є Беккерель (Бк) – активність нукліда в радіоактивному джерелі, в якому за одну секунду має місце один розпад.



Одиниця активності нукліда – кюрі (Ки), що використовується як позасистемна, відповідає  $3,7 \cdot 10^{10}$  розпадів в секунду в одному грамі радію.

Співвідношення між одиницями активності Кюрі і Беккерель:  $1\text{Ки} = 37 \cdot 10^{10} \text{Бк}$ .

Питома активність – це активність, яка приходить на одиницю маси або об'єму речовини, Бк/кг.

Поглинена доза випромінювання – це енергія випромінювання, що поглинена одиницею маси речовини протягом часу випромінювання. За одиницю поглиненої дози випромінювання прийнято грей (Гр) – поглинену дозу іонізуючого випромінювання, при якому речовині масою 1 кг передається енергія іонізуючого випромінювання 1 Дж.

Для кількісної характеристики квантового випромінювання в живому організмі використовується величина експозиційної дози, тобто дози, що поглинена в повітрі в аналогічних умовах випромінювання. За одиницю експозиційної дози прийнято кулон на кілограм (Кл/кг) – експозиційна доза рентгенівського й гамма-випромінювання, при якій сполучена корпускулярна емісія в сухому атмосферному повітрі масою 1 кг створює іони, які несуть електричний заряд кожного знаку, рівний 1 Кл.

Зіверт – поглинена доза будь-якого виду іонізуючого випромінювання, яка має таку ж саму біологічну ефективність, як один грей (Дж/кг).

Структура доз опромінення населення України від природних джерел така: внутрішнє  $\beta$ -опромінення – 5,1%; космічне випромінювання – 5,6%; природний  $\gamma$ -фон – 3,3%; вмісти у воді радіонуклідів урану, радію та радону – 2,8%; радіоактивність будівельних матеріалів – 5%; радон у повітрі – 78,2%. Сумарна доза опромінення від природних джерел складає 4,88 мЗв/рік, із них 3,8 мЗв/рік приходить на радон у повітрі приміщень.

Ефективна сумарна питома активність природних радіонуклідів радію-226, торію-232, калію-40 в сировині та будівельних матеріалах як регламентований радіаційний параметр визначається із виразу, Бк/кг

$$A_{\text{еф}} = A_{\text{Ra}} + 1,31 A_{\text{Th}} + 0,085 A_{\text{K}}, \quad (1.2)$$

де  $A_{\text{Ra}}$ ,  $A_{\text{Th}}$ ,  $A_{\text{K}}$  – відповідно, питома активність радію-226, торію-232 та калію-40;

**1,31** та **0,085** – вагові коефіцієнти для торію-232 й калію-40 по відношенню до радію 226.

В залежності від концентрації радіонуклідів будівельні матеріали поділяються на три класи з вказанням відповідних умов їх використання. До першого класу відносяться будівельні матеріали з  $A_{\text{еф}} < 370$  Бк/кг і вони можуть використовуватися без обмеження. До другого класу належать будівельні матеріали з  $A_{\text{еф}} = 370 \dots 740$  Бк/кг і вони використовуються для промислового й дорожнього будівництва. Будівельні матеріали з  $A_{\text{еф}} = 740 \dots 1350$  Бк/кг відносяться до третього класу і вони можуть вико-

ристовуватися для будівництва об'єктів, де виключається постійне перебування людей.

Середньорічна ефективна доза опромінення населення України від джерел природної радіоактивності складає 5,3 мЗв/рік. Найбільшу небезпеку для людини становить опромінення, яке вона одержує від радонової складової (78,2%). Радон – це невидимий, без смаку й запаху газ, що у 7,5 разу важчий за повітря. Він є продуктом розпаду радіоактивних речовин, що містяться у гірських породах українського кристалічного щита. Найбільш радононебезпечними регіонами України є Одеська, Херсонська, Донецька і Вінницька області. Результати обстеження житлових приміщень свідчать, що концентрація радону в їх повітрі суттєво перевищує допустиме значення, яке становить 50 Бк/м<sup>3</sup>.

На величину концентрації радону-222 в повітрі будівель впливають їх ландшафтна прив'язка, конструктивно-планувальні рішення будівель й приміщень в них, повітря і газопроникність будівельних матеріалів, з яких виготовлені конструктивні елементи споруд, та наявність в них тріщин, конструктивні особливості і режим роботи систем вентиляції та опалювання.

Процес надходження радіонуклідів радону-222 в повітря приміщень внаслідок ексхаляції через захисні конструкції будівель при радіоактивному розпаді радію-226 описується рівнянням

$$C_o(t) = \left[ \left( \frac{\sum q_i S_i}{w(\lambda_o - \lambda_v)} + \frac{C_o^a \lambda_v}{\lambda_o - \lambda_v} \right) \{1 - \exp[-(\lambda_o + \lambda_v)t]\} + C_o(0) \exp[-(\lambda_o + \lambda_v)t] \right] \quad (1.3)$$

де  $q_i$  - швидкість ексхаляції радону-222 через захисні конструкції;

$S_i$  - площа захисних конструкцій, через які відбувається ексхаляція радону-222;

$w$  - об'єм приміщення;

$\lambda_o$  - постійна розпаду радону-222;

$\lambda_v$  - кратність повітрообміну в приміщенні;

$C_o(0)$  - об'ємна активність радону-222 в приміщенні при  $t = 0$ ;

$C_o^a$  - об'ємна активність радону-222 в атмосферному повітрі;

$t$  - час надходження радіонуклідів радону-222.

В залежності від геологічних умов швидкість ексхаляції радону-222 із земних порід знаходиться в межах  $2,1 \cdot 10^{-4} \dots 5,25 \cdot 10^{-2}$  Бк/(м<sup>2</sup>·с).

Суттєво на концентрацію радону-222 в повітрі приміщень впливає кратність повітрообміну. За умов, що швидкість ексхаляції радону для всіх стін, підлоги та стелі однакова а також  $\lambda_v = \lambda_o + W$ , оскільки при одному

обміні за годину  $\lambda_0 = 2,78 \cdot 10^{-4} \text{ C}^{-1}$ , об'ємна активність радону в приміщенні становить

$$C_0 = \frac{q S}{W \lambda_v} + C_0^a. \quad (1.4)$$

Зміну концентрації радону-222 за певний проміжок часу у вентиляованому приміщенні за умови, що газоповітряна суміш не стискується, можна подати у вигляді рівняння

$$C(t) = \frac{C_n (W + (q_r + q_v) t_0) q_r (t - t_0)}{W + (q_r + q_v) t_0}, \quad (1.5)$$

де  $C_n$  - концентрація радону-222 в приміщенні об'ємом  $W$  в режимі, що встановився;

$q_r$  - інтенсивність надходження газу радону-222;

$q_v$  - продуктивність вентиляції;

$t, t_0$  – відповідно, час перехідного процесу та час, протягом якого відбувається вентиляція приміщення.

Аналіз рівняння (1.5) свідчить, що із збільшенням продуктивності вентиляції концентрація радону-222 в приміщенні зменшується.

Складові частини опромінення за рахунок природних джерел є нерегульовані та регульовані. До нерегульованих джерел опромінення відносяться  $\beta$ -опромінення, космічне опромінення і природний  $\gamma$ -фон. Опромінення за рахунок радіоактивності будівельних матеріалів, радону в повітрі та радіонуклідів у воді є регульовані відповідними організаційно-технологічними рішеннями в період проектування, будівництва й експлуатації об'єктів житлово-цивільного й промислового призначення. Управління опроміненням здійснюється на базі експертно-моделювальних систем прийняття ефективних рішень в залежності від доступності експертної інформації.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗНАТЬ

1. Дайте характеристику джерел забруднення.
2. Наведіть класифікацію атмосферних забруднень газових викидів.
3. Охарактеризуйте основні властивості пилу.
4. Як класифікують пил за злипанням.
5. Назвіть групи пилу за питомим електричним опором.
6. Поясніть основні властивості шкідливих газових викидів.
7. Наведіть параметри радіоактивних забруднювачів.

## 2 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ

### 2.1 Основні фізичні параметри стану атмосфери і метеорологічні елементи

При проектуванні й експлуатації систем теплогазопостачання й вентиляції та охорони повітряного басейну визначальними є фізичні явища і процеси, що протікають в атмосфері. До цих процесів і явищ відносяться проходження сонячної радіації, термодинамічні процеси, рухи атмосферного повітря різних масштабів, перетворення водяного пару й льоду, оптичні й електричні явища тощо.

Кількісна характеристика стану атмосфери в певний момент часу визначається такими фізичними параметрами та метеорологічними елементами:

- сонячна радіація та радіаційний баланс;
- температура, тиск, вологість і густина повітря, їх розподіли;
- швидкість і напрям вітру, градієнт швидкості;
- вид, інтенсивність та кількість опадів;
- границі видимості.

Всі ці метеорологічні елементи тісно зв'язані між собою. За зміною одних метеорологічних елементів можна робити висновки про можливі зміни інших елементів та явищ.

Фізичними процесами, що супроводжуються якісною зміною стану атмосфери, є тумани, грози, снігопади, урагани і т. п. В залежності від типу процесів фізика атмосфери ділиться на три підрозділи:

- фізика приземного шару атмосфери, що за висотою становить декілька десятків метрів;
- фізика вільної атмосфери, або аерологія, що за висотою становить до 100 км;
- фізика верхніх шарів атмосфери, або аерономія, що за висотою становить тисячі кілометрів.

Основними компонентами газового складу атмосферного повітря є азот (78,095%) та кисень (20,95%). Крім газів у фізичному складі атмосферного повітря є дуже дрібні й рідкі частинки аерозолі, а також радіоактивні та іонізовані частинки. Склад водяної пари в атмосферному повітрі коливається від 4% до надзвичайно малих значень. На висотах 15...45 км знаходиться шар озону, що сильно поглинає ультрафіолетову радіацію, особливо в області 0,15...0,25 мкм. Тверді й рідкі домішки є ядрами конденсації водяної пари в атмосфері.

На висоті всього 10 км густина повітря становить тільки третину від приземної густини, а на висоті 100 км – лише одну мільйонну частину.

Найбільш суттєву роль в зміні стану атмосферного повітря відіграють атмосферні вихри, циклони й антициклони. Циклони й антициклони переміщуються. Особливу роль в цих процесах мають атмосферні фронти,

що розділяють теплі й холодні повітряні маси.

Використовуючи закони фізики й методи фізичних досліджень, вивчають явища й процеси, що відбуваються в земній атмосфері, та встановлюють їх причини й взаємозв'язок. Однією з основних задач цих досліджень є можливість передбачення подальшого розвитку явищ й процесів, що впливають на характер забруднення атмосферного повітря.

## 2.2 Радіаційні процеси в атмосфері

Джерелом енергії на Землі, всіх явищ і процесів, що проходять на земній поверхні і в атмосфері, є промениста енергія, яка безперервно надходить від Сонця. Потік сонячної енергії, перпендикулярний поверхні верхньої границі атмосфери, називається **сонячною сталою**, що дорівнює  $S_0=1,382$  кВт/м<sup>2</sup>. За добу поверхня Землі дістає від Сонця більше тепла, ніж його могло б дати все пальне, що спалене людством за 1000 років при теперішній річній траті.

Температура видимої поверхні Сонця - фотосфери, що випромінює радіацію - становить 6000°К. Температура “плям” у фотосфері – порядку 4500°К. Кількість “плям” періодично змінюється. Роки максимумів та мінімумів чергуються в середньому через 11 років. В роки максимумів в атмосфері Землі відбуваються значні відхилення в протіканні різних явищ.

При вивченні сонячної радіації, земного і атмосферного випромінювання використовують закони теплового випромінювання.

Закон Кірхгофа встановлює зв'язок між випромінювальною і поглинальною здатністю тіл

$$I_T / \kappa_T = \text{const} , \quad (2.1)$$

де  $I_T$  – випромінювальна здатність, що дорівнює кількості енергії для певної довжини електромагнітної хвилі, що випускається за одну секунду одним квадратним сантиметром поверхні тіла при температурі  $T$  (Вт/м<sup>2</sup>);

$\kappa_T$  – поглинальна здатність, що вимірюється відношенням променистої енергії, яка поглиналась тілом при температурі  $T$ , до повної енергії, що впала на тіло.

Закон Стефана-Больцмана характеризує залежність випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від його температури

$$E = \sigma T^4 , \quad (2.2)$$

де  $E$  – кількість променистої енергії, що випромінюється одиницею поверхні тіла за одиницю часу, кВт/м<sup>2</sup>;

$\sigma$ - постійна Стефана-Больцмана,  $\sigma = 5,6 * 10^{-11}$  кВт/м<sup>2</sup>.

Потрапляючи на верхню границю атмосфери, сонячна радіація знаходиться у межах довжини електромагнітних хвиль 0,17...4,0 мкм. Видима частина з довжиною хвиль 0,40...0,76 мкм становить 48%, ультрафіолетова частина з довжиною хвиль 0,17...0,4 мкм – 7% та інфрачервона частина з довжиною хвиль більше 0,76 мкм – 45% .

При проходженні атмосфери частина випромінювання поглинається озоном, киснем, вуглекислим газом та водяною парою. Короткохвильова частина випромінювання поглинається сильніше, до Землі приходить більш довгохвильове випромінювання, інфрачервоне випромінювання нагріває Землю. Завдяки розсіюванню радіації молекулами повітря і частинами пилу пряма сонячна радіація ослабляється, але збільшується розсіяна в атмосфері. Короткохвильова радіація розсіюється більше, ніж довгохвильова.

Інтенсивність прямої сонячної радіації визначається висотою Сонця ( $h$ ), прозорістю атмосфери й висотою спостереження. Частина довгохвильового спектра поглинається більше, коли в атмосфері більше водяної пари. Наявність пилу зменшує пряму і збільшує розсіяну сонячну радіацію в атмосфері.

Кількість енергії, що падає на горизонтальну поверхню, тобто інсоляція, залежить від кута падіння променів на площадку

$$S = S_0 * \sin h , \quad (2.3)$$

де  $S_0$  – потік енергії на перпендикулярну до потоку площадку;

$h$  – висота Сонця.

Добовий хід інтенсивності прямої сонячної радіації на поверхні Землі був би симетричним відносно обіду, якби прозорість атмосфери протягом дня не змінювалась. Але фактична крива добового ходу є нижчою від теоретичної та несиметричною, оскільки прозорість по обіді за рахунок прогріву атмосфери і висхідних течій знижується. У середніх широтах в річному ході прямої сонячної радіації максимум припадає на квітень – травень, а мінімум – на грудень.

Сума тепла прямої сонячної радіації – сума енергії сонячного випромінювання, що отримує одиниця площі поверхні Землі за певний проміжок часу (година, доба, місяць, рік). На території України при середній прозорості атмосфери земна поверхня отримує більше 60% сонячної радіації, що проходить на верхню межу атмосфери. Це обумовлено значним впливом хмарності.

Інтенсивність розсіяної радіації – це потік розсіяної сонячної енергії, що припадає на одиницю горизонтальної поверхні. Інтенсивність розсіяної радіації визначається висотою Сонця, прозорістю атмосфери, хмарністю і наявністю снігового покриття. Невеличка частина розсіяної радіації повертається назад у космічний простір. Значна її частина досягає земної пове-

рхні та збільшує надходження теплової енергії. Завдяки розсіюванню існує денна освітленість при суцільних хмарах та бачимо предмети, що знаходяться в тіні.

Сумарна радіація – це сума прямої радіації на горизонтальну поверхню **S** та розсіяної **D**:

$$Q = S + D. \quad (2.4)$$

Сумарна радіація змінюється в широких межах в залежності від висоти Сонця, широти місцевості, прозорості атмосфери тощо.

Частина потоку сонячної енергії відбивається від земної поверхні. Альbedo – це відношення потоку сонячної короткохвильової радіації  $Q_b$ , відбитої від земної поверхні, до сумарної радіації, що надходить на цю поверхню

$$A = Q_b / Q . \quad (2.5)$$

Альbedo виражається в долях одиниці або в процентах і змінюється в межах 0,08...0,8.

Поглинута земною поверхнею сонячна радіація

$$Q_n = Q (1 - A) . \quad (2.6)$$

Ефективне випромінювання Землі – це різниця між власним довгохвильовим випромінюванням земної поверхні і поглинутою частиною зустрічного випромінювання атмосфери. В практичних розрахунках визначається за формулою М. І. Будико:

$$J_e = J_0 (1 - c n) + 4 \delta \sigma T^3 (T_n - T) , \quad (2.7)$$

де  $J_0$  – ефективне випромінювання при безхмарному небі;

$n$  – середня хмарність;

$c$  – коефіцієнт, значення якого 0,08...0,8;

$\delta$  – коефіцієнт, що характеризує відмінність властивостей випромінюючої поверхні від властивостей чорного тіла і рівний 0,95;

$\sigma$  - стала Стефана – Больцмана;

$T$  – абсолютна температура повітря;

$T_n$  – абсолютна температура випромінюючої поверхні.

Радіаційний баланс земної поверхні – це різниця потоків променевої енергії, що надходять на поверхню Землі і втрачаються нею:

$$R = (S + D) (1 - A) - J_e . \quad (2.8)$$

Якщо  $R > 0$ , то земна поверхня нагрівається, і навпаки.

Радіаційний баланс систем Земля – атмосфера визначається як баланс у потоках сонячної енергії між вертикальним стовпом атмосфери із висотою до верхньої межі та земною поверхнею:

$$R = (S + D)(1 - A) + Q - E, \quad (2.9)$$

де  $Q$  – кількість радіації, що поглинається атмосферою;

$E$  – кількість радіації, що відходить у світовий простір.

На території України поглинена радіація в середньому за рік становить 3100...3200 МДж/м<sup>2</sup> в північних районах, 4200...4300 МДж/м<sup>2</sup> на південному березі Криму, а радіаційний баланс відповідно змінюється від 1700 МДж/м<sup>2</sup> до 2600 МДж/м<sup>2</sup>.

Середня річна величина радіаційного балансу у Вінницькій області змінюється від 1800 МДж/м<sup>2</sup> на півночі до 2000 МДж/м<sup>2</sup> на півдні. Влітку радіаційний баланс по області змінюється в межах 920...1000 МДж/м<sup>2</sup>. Взимку на півночі області він складає 17 МДж/м<sup>2</sup>, на півдні – 33 МДж/м<sup>2</sup>. В грудні та січні радіаційний баланс від'ємний, тобто земна поверхня втрачає більше тепла, ніж отримує його від Сонця.

### 2.3 Тепловий режим атмосфери

Тепловий режим атмосфери визначається процесами нагрівання й охолодження атмосферного повітря. Основним джерелом нагрівання повітря є земна поверхня, тому що поглинання короткохвильової сонячної радіації в атмосфері є періодичним. В день земна поверхня нагрівається більше від повітря, бо інсоляція переважає над випромінюванням. Тепло передається від повітря до ґрунту. Вночі ґрунт втрачає тепло внаслідок випромінювання і його температура нижча від повітря.

Передача тепла від ґрунту до повітря відбувається за рахунок таких процесів: молекулярної теплопровідності, теплової конвенції, турбулентності, опромінення та переносу тепла у прихованім вигляді разом з водяною парою. Мають місце також адвективні процеси внаслідок перенесення тепла або холоду повітряними потоками в горизонтальному напрямі.

На нагрівання повітря впливає характер підстилаючої поверхні землі. Цей вплив особливо сильно проявляється в приземному шарі повітря товщиною до 2 метрів. З висотою цей вплив ослаблюється. В високих шарах внаслідок турбулентного змішування температура в вертикальному й горизонтальному напрямках вирівнюється.

Добовий хід температури повітря визначається: широтою місця, часом року, рельєфом, характером підстилаючої поверхні, хмарністю та ви-



сотою над поверхнею ґрунту. Із збільшенням широти температура зменшується. Випуклі форми рельєфу зменшують амплітуду добових коливань, а вгнуті - збільшують. Над сушею амплітуда добових коливань температури становить 10...15°C. У світлі дні амплітуда добових коливань є більшою, ніж у хмарні. Взимку добові коливання температури згасають на висоті 0,5 км, а влітку є суттєвими навіть на висоті 1,5...2,0 км.

Річний хід температури повітря визначається характером середніх місячних величин. Максимум температури спостерігається в липні, а мінімум – в січні. Із збільшенням широти місцевості річна амплітуда температури збільшується і досягає значень 50...70°C.

Вертикальний температурний градієнт - це зміна температури атмосферного повітря на кожні 100 м висоти, що взята з протилежним знаком:

$$\Delta t = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{H_{\text{в}} - H_{\text{н}}} 100\% , \quad (2.10)$$

де  $t_{\text{в}}$  – температура повітря на висоті  $H_{\text{в}}$ ;

$t_{\text{н}}$  - температура повітря на висоті  $H_{\text{н}}$ .

Якщо  $t_{\text{в}} < t_{\text{н}}$ , то вертикальний температурний градієнт  $\Delta t$  додатний, і навпаки.

Вертикальний температурний градієнт визначає вертикальний розподіл температури в нерухомій атмосфері, який називається термічною стратифікацією атмосфери. Шар повітря, в якому  $\Delta t = 0$ , називається шаром ізотермії. Коли вертикальний температурний градієнт змінюється з висотою, шар повітря називається шаром інверсії. Вертикальний температурний градієнт на висоті до 3 км становить близько 0,5°C/100 м.

Вирішальна роль у поширенні тепла в атмосфері належить вертикальному обміну, тобто висхідним й низхідним рухам повітрям. Інтенсивність вертикальних рухів в атмосфері залежить від вертикальної рівноваги, яка може бути стійкою, байдужою та нестійкою. Стійка рівновага – це такий стан повітряного шару, коли при будь-якому вертикальному зміщенні повітряної маси всередині цього шару виникають сили, що перешкоджають цьому зміщенню і повертають цю зміщену масу повітря на її попередній рівень. При байдужій рівновазі не виникають протидійні сили. Нестійка рівновага повітряного шару виникає тоді, коли при будь-якому русі повітряної маси існують сили, що підтримують це зміщення.

Рівень конвекції – це висота, на якій висхідні рухи повітря припиняються. Рівень конвекції залежить від початкової різниці температур і від вертикального градієнта температури. При великих значеннях вертикальних температурних градієнтів створюється дуже нестійка приземна стратифікація. Внаслідок цього утворюються енергійні конвективні потоки.

В приземній атмосфері завжди спостерігаються шари інверсії, які за походженням бувають радіаційні і адвективні. Радіаційні інверсії утворюються при охолодженні земної поверхні внаслідок нічного випромінюван-

ня. Взимку інверсійні приземні шари можуть досягати висоти сотень метрів. Особливо сильними радіаційні інверсії є в тихі та ясні ночі. Приземна радіаційна інверсія підсилюється в умовах різко вираженого рельєфу, де охолоджене повітря стікає в низини й улоговини. Адвективні інверсії утворюються, коли тепле повітря припливає на більш холодну підстилаючу поверхню.

Термічний режим повітря на території України залежить від радіаційного й теплового балансів. Багаторічні середні добові температури повітря досягають найбільших значень (20...25°C) в третій декаді липня, а найнижчі середні добові температури (-10...-3°C) спостерігаються в третій декаді січня. Літом середні місячні температури змінюються від 17...19°C на півночі до 22...24°C в південних районах. Середні місячні температури зимою досягають -8°C на північному сході і підвищуються на півдні до +4°C в Криму.

Середня річна температура повітря на Вінниччині змінюється від 6,9°C на півночі до 8,9°C на півдні. На річний хід температури повітря на території області значно впливає особливість розвитку атмосферної циркуляції. Середня температура повітря січня змінюється від +2°C до -15,4°C при багаторічній нормі - -5,3°C. Липень характеризується найвищою середньомісячною температурою, яка по області становить +19°C. Екстремальні температури повітря визначаються атмосферними процесами. Спостерігалися абсолютний максимум температури повітря (+40°C) та абсолютний мінімум (-35°C).

## 2.4 Водяна пара в атмосфері

Кількість водяної пари в атмосфері визначається фізико-географічними умовами місцевості, умовами погоди, періоду року чи доби. Водяна пара є найбільш мінливою складовою атмосферного повітря.

Водяна пара в атмосфері створює парціальний тиск, який називається пружністю пари ( $e$ ). При збільшенні пружності пари в повітрі досягається її критичне значення, що відповідає стану рівноваги (насичення). Стан насичення характеризується максимальною пружністю ( $E$ ) водяної пари при даній температурі  $t$ , величина якої обчислюється за емпіричною формулою, ГПа:

$$E = 6,1 \cdot 10^{7,63 t / (242+t)} . \quad (2.11)$$

Випаровування в природних умовах з різних ділянок земної поверхні характеризується інтенсивністю випаровування, яку можна обчислити за формулою, кг/м<sup>2</sup>с:

$$C = c v (E - e) , \quad (2.12)$$

де  $c$  – коефіцієнт, що залежить від висоти вимірювання парціального тиску;

$v$  - швидкість вітру над поверхнею.

В природних умовах водяна пара постійно надходить в навколишнє середовище, але лише в незначній товщі приземного шару повітря стан її є близьким до насичення.

На величину випаровування в природних умовах впливають наявні теплоенергетичні та водні ресурси, фізичні властивості ґрунту, рельєф та характер рослинного покриття. Величину сумарного випаровування можна визначити за формулою, яку запропонував В.С. Мезенцев:

$$Z = Z_m \left[ 1 - \left( \frac{X + W_1 - W_2}{Z_m} \right)^{-n} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (2.13)$$

де  $Z_m$  – водний еквівалент теплоенергетичних ресурсів процесу сумарного випаровування;

$X$  – кількість опадів;

$W_1, W_2$  - запаси вологи в ґрунті на початок та кінець періоду;

$n$  - параметр, що характеризує ландшафтні умови підстилаючої поверхні.

Величини, що характеризують вологість повітря, це абсолютна й відносна вологість, дефіцит вологості, вологовміст та дефіцит точки роси.

Абсолютна вологість – це маса водяної пари, що вміщується в одиничному об'ємі повітря, г/м<sup>3</sup>

$$a = 217 e / T, \quad (2.14)$$

де  $e$  – пружність пари, Па;

$T$  – температура повітря, °К.

Відносна вологість – це відношення пружності пари до максимальної пружності водяної пари при даній температурі, %

$$\phi = e / E * 100. \quad (2.15)$$

Дефіцит вологості визначається за формулою, Па:

$$\Delta e = E - e. \quad (2.16)$$

Вологовміст – це відношення маси водяної пари до маси сухого повітря, що вміщується в даному об'ємі, г/кг:

$$d = 622 e / (P - e), \quad (2.17)$$

де  $P$  – маса волого повітря, кг.

Дефіцит точки роси – це різниця між температурою повітря ( $t$ ) і точкою роси ( $t_p$ ):

$$\Delta t = t - t_p . \quad (2.18)$$

Розподіл пружності водяної пари з висотою залежить від характеру процесів випаровування й конденсації, температурних умов, утворення опадів, конвективного й турбулентного обміну. За рахунок віддаленості від джерел випаровування та зниження температури кількість водяної пари в атмосфері з висотою зменшується. Відносна вологість також знижується з висотою, але нерівномірно. При перевищенні максимальних значень пружності пари вода з пароподібного стану переходить в рідкий або твердий стан. Внаслідок конденсації утворюються краплі дощу або туман, а в результаті сублімації – сніг або град.

Конденсація парів води в неочищеному від домішок повітрі відбувається при відносній вологості 110...120%. Ядрами конденсації є пил, аерозолі, зола тощо. Більша частина дрібних крапель води в атмосфері при температурах  $-12...-17^{\circ}\text{C}$  утворює тверді кристали льоду чи снігу. Великі краплини води можуть замерзнути при температурах ближчих до  $0^{\circ}\text{C}$ .

При конденсації або сублімації водяної пари у нижніх шарах атмосфери утворюються дуже дрібні краплі води або кристали льоду. В залежності від діаметра краплинок спостерігаються тумани або димка. За умовами охолодження атмосфери тумани поділяються на адвективні та радіаційні.

Хмари утворюються в результаті адіабатичного охолодження, тобто виділення прихованої теплоти конденсації чи сублімації, конвективно піднятого повітря або охолодження його радіацією. В залежності від типів процесів, що переважають в атмосфері (конвекція, турбулентність, радіаційне охолодження, фронтальні явища), утворюються різні типи хмар, а саме хвилясті, перисті, шаруваті або купчасто-куччасті. Хмарність визначається візуально за десятибальною міжнародною шкалою. Розпізнають такий стан неба: 0-2 бали – ясне небо, 3-7 балів – напівясне, 8-10 балів, коли усе небо покрито хмарами, похмуре.

Відносна вологість в середньому за рік по всій Україні складає 63...70%, а в горах становить 73...75%. Влітку середні місячні величини відносної вологості на рівнинних територіях складають 55...60%, а в східних районах досягають значень 45...49% та підвищуються в горах до 66...70%. Взимку на всій території середні місячні значення відносної вологості складають біля 80%. В середньому за рік величини випаровування складають 300...350 мм на півдні та досягають 500 мм в північно-західних районах і 600 мм в Карпатах.

Парціальний тиск водяної пари на території Вінниччини має чіткий річний хід і збільшується з півночі на південь. Мінімальні значення парціальний тиск (3,7...4,7 ГПа) приймає в холодні місяці року. Найбільше значення парціального тиску водяної пари (15...16 ГПа) спостерігається в липні. Величина річного парціального тиску в середньому по області складає 8,9 ГПа. Найбільше значення відносна вологість над Вінниччиною має взимку

(92...96%). Весна є найбільш сухим періодом року, а в травні спостерігається найменша відносна вологість (68%).

Середній багаторічний дефіцит вологості взимку становить 0,6...0,7 ГПа, а найбільші значення в липні місяці (6,7...7,2 ГПа).

Середні багаторічні значення сумарного випаровування по області складають 510...540 мм/рік. Літом випаровування становить 80...100 мм на місяць. Найбільша хмарність (6...8 балів) спостерігається в зимові місяці, а найменша (3...5 балів) - у серпні.

## 2.5 Атмосферний тиск

Атмосферний тиск – вага стовпа атмосферного повітря з площею основи 1 м<sup>2</sup>, що знаходиться над нею і тягнеться до верхньої межі атмосфери. Атмосферний тиск в даному місці постійно змінюється, що обумовлено нагріванням і охолодженням повітря та іншими атмосферними процесами.

За стандартний атмосферний тиск приймають такий, що дорівнює вазі ртутного стовпа висотою 760 мм площею перерізу 1 м<sup>2</sup> при температурі 0°C на рівні моря і на широті 45°.

Одиницею виміру тиску є паскаль (Па) та гектопаскаль (ГПа) . Нормальний тиск атмосфери складає 1013 ГПа.

З висотою сумарна маса стовпа атмосферного повітря зменшується, отже і атмосферний тиск падає. Залежність між висотою й тиском з врахуванням зміни вологості описується барометричною формулою Лапласа

$$H_2 - H_1 = 18400 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \left(1 + 0,378 \frac{e}{p}\right) (1 + 0,0026 \cos 2\varphi) (1 + \beta_2) \log \frac{P_1}{P_2} \quad (2.19)$$

де  $H = (H_1 + H_2)/2$  – висота над рівнем моря середини шару атмосфери, що розглядається;

$t, e, p$  – середні за висотою шару значення температури, відносної вологості та тиску атмосфери;

$P_1$  та  $P_2$  – тиск температури на відповідних висотах  $H_1$  та  $H_2$ ;

$\varphi$  – широта місцевості;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт;

$\beta$  – коефіцієнт, що характеризує зміну прискорення вільного падіння.

Баричним ступенем називається висота  $h$ , на яку треба опуститися або піднятися, щоб тиск змінився на 1 ГПа, м/ГПа

$$h = \Delta H / \Delta p . \quad (2.20)$$

При нормальному тиску  $p_0 = 1013$  ГПа і  $t = 0^\circ\text{C}$ , баричний ступінь  $h = 7,8$  м/ГПа.

Вертикальний баричний градієнт – це величина, що обернена до ба-

ричного ступеня і означає зміну тиску при переміщенні на одиницю висоти, гПа/100 м.

$$G_B = - \frac{dp}{dz} = \frac{gp}{RT}, \quad (2.21)$$

де  $R$  – газова постійна ( $8,314 \cdot 10^3$  кДж/кг °К)

$T$  – температура, °К;

$G$  – гравітаційна стала ( $9,806$  м/с<sup>2</sup>).

Відповідно до формули (2.21) тиск спадає повільніше в теплому повітрі, ніж у холодному.

Атмосферний тиск змінюється не тільки по висоті шару атмосфери, але також в горизонтальному напрямі. Горизонтальний баричний градієнт

$$G_G = - \Delta P / \Delta r, \quad (2.22)$$

де  $\Delta r$  – горизонтальна відстань між точками за нормаллю до ізобар.

Ізобари – це лінії однакових величин атмосферного тиску на рівні моря. Просторовий розподіл атмосферного тиску, що характеризується системою ізобаричних поверхонь, називається баричним полем.

Області зімкнутих ізобар із зниженим атмосферним тиском відносно нормального ( $p_0 = 1013$  ГПа) називаються баричними мінімумами або циклонами.

Області зімкнутих ізобар із підвищеним атмосферним тиском в центрі називаються баричними максимумами або антициклонами.

Атмосферний тиск міняється неперіодично та не має правильного ходу. Зміни тиску обумовлені термічними й динамічними причинами. Територія України характеризується континентальним типом річного ходу тиску з мінімумом влітку та максимумом взимку. При підвищеному тиску спостерігається невелика хмарність. Зниження тиску є причиною посилення вітру, збільшення хмарності та коливань температури й вологості повітря.

В цілому за рік над Україною баричне поле являє собою сідловину. Середній річний атмосферний тиск в Вінницькій області складає 983 ГПа. Максимальні значення атмосферного тиску припадають на січень та жовтень, а мінімальні – на липень. Найбільший атмосферний тиск, що був зафіксований на території області – 1042 ГПа, а найнижчий – 916 ГПа.

Зміна атмосферного тиску має певні закономірності і в добовому ході. Максимуми відмічаються взимку о 13...15 год. та о 1...3 год., а влітку – о 12 год. та о 2...4 год. і обумовлені розвитком термічної конвенції. Зимом мінімум утворюється о 4...6 год. та о 16...20 год.

## 2.6 Рухи атмосферного повітря

В результаті нерівномірності розподілу атмосферного тиску в різних місцях Земної кулі відбувається переміщення повітря із областей з високим тиском в області з низьким тиском. Внаслідок цих переміщень виникає вітер, тобто горизонтальний рух повітря відносно земної поверхні. Рух відбувається до тих пір, поки тиск в горизонтальному напрямку не вирівняється. Вітер переносить на великі відстані речовини, що викидають в атмосферу різні джерела забруднювачів. Енергію вітру почали використовувати для потреб господарської діяльності людини.

Вітер характеризується напрямком руху та його швидкістю. Напрямок вітру визначається тією стороною світу, звідки він дме. Для позначення напрямку руху вітру використовують 16 румбів, основними з яких є північний, північно-східний, східний, південно-східний, південний, південно-західний, західний та північно-західний.

Швидкість вітру визначається за 12 бальною шкалою Бофорта (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Швидкість та характеристика вітру

Бал	Швидкість, м/с	Характеристика
0	0...0,5	Штиль
2	1,8...3,3	Легкий вітер, що відчувається
6	9,9...12,4	Значний вітер, що хитає велике гілля дерев
10	21,6...25,1	Сильний шторм, що ламає дерева
12	29	Спустошливий ураган, тайфун

Біля земної поверхні вітер не має постійної швидкості й напрямку. Поривчастість вітру обумовлюється його турбулентним характером. Поривчастість вітру є сильнішою над пересіченою місцевістю і зменшується зі збільшенням шару повітря над землею поверхнею. У річному ході поривчастість зростає на весну, є значною літом і падає взимку. У добовому ході максимум поривчастості має місце в обідній час, а мінімум – в нічний час. При обтіканні вітром перешкод значно змінюється напрям і швидкість, що є причиною виникнення завихрення.

Повітряними масами називають порівняно однорідні за властивостями об'єми повітря, що займають значні простори. Горизонтальна протяжність повітряної маси досягає кількох тисяч кілометрів, а вертикальна – декілька кілометрів. За географічною ознакою повітряні маси є: арктичні

холодні, помірні, теплі й маловологі, тропічні теплі і сухі та екваторіальні теплі і дуже вологі. Разом із рухомими повітряними масами переміщуються фронти. Теплий фронт утворюється, коли тепле повітря напливає на холодне, яке відступає. Холодний фронт утворюється, коли холодне повітря наступає, підтікає під тепле, яке відходить.

Загальною циркуляцією атмосфери називається вся сукупність течій великого масштабу, за допомогою якої здійснюється обмін значних мас повітря в вертикальному й горизонтальному напрямках. Суттєвими складовими загальної циркуляції атмосфери є циклони та антициклони, що забезпечують обмін повітря у меридіальному напрямку. Першопричиною руху повітря в горизонтальному напрямі є неоднорідний розподіл температур по земній кулі. Внаслідок загального розподілу атмосферної температури і тиску утворюється зональність повітряних потоків, тобто рухів повітря вздовж паралелей.

Місцевими вітрами називають повітряні течії, що обумовлені місцевими контрастами температур й тисків повітря. Місцевими вітрами є бризи, гірськодолинні, стічні та фени. Бризи дмуть вдень з водної поверхні на сушу, а вночі з суші на водну поверхню. Гірськодолинні вітри вночі направлені із схилів гір у долину, а вдень із долини вздовж схилів – догори. Фен – це теплий сухий вітер, що дме з гір. Стічний вітер утворюється над льодовиками.

Розподіл напрямків вітру в холодний період року обумовлений наявністю над Україною смуги високого тиску. Над Вінниччиною переважають в цей час західні, південно-західні, південні та південно-східні вітри. Найменше зимою бувають північні та північно-східні вітри. Весною внаслідок послаблення Сибірського антициклону найбільшу повторюваність в Подільському регіоні мають північно-західні, східні й північно-східні вітри. Влітку над Вінниччиною переважають внаслідок активізації азовського антициклону північно-західні та західні вітри. Тобто, протягом року по області в основному переважають західні та північно-західні вітри.

## 2.7 Перенесення забруднювачів в атмосфері

Рух окремих частинок забруднювачів в атмосфері, а саме газів, пари, аерозолів й пилу, відбувається внаслідок молекулярної та турбулентної дифузії.

Молекулярна дифузія домішок за рахунок броунівського хаотичного руху й різниці концентрації домішок у найпростішому одновимірному випадку та при відсутності зовнішніх сил описується першим законом Фіка:

$$I_{i(x)} = -D_i \frac{dC_i}{dx}, \quad (2.23)$$



де  $I_{i(x)}$  - потік  $i$ -х домішок через одиницю площі за одиницю часу;

$C_i$  – концентрація  $i$ -х домішок;

$D_i$  – коефіцієнт дифузії  $i$ -х домішок;

$X$  – координата.

Відповідно до кінетичної теорії газів коефіцієнт дифузії

$$D = V \lambda / 3, \quad (2.24)$$

де  $V$  – середня швидкість молекул;

$\lambda$  - довжина вільного пробігу молекул.

Враховуючи, що середня швидкість пробігу і довжина вільного пробігу молекул мають малі значення, то коефіцієнт дифузії становить  $10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$ .

У тривимірному випадку, коли коефіцієнт дифузії домішок не залежить від їх концентрації рівняння молекулярної дифузії має вигляд

$$\frac{dC}{dt} = D \left( \frac{d^2C}{dx^2} + \frac{d^2C}{dy^2} + \frac{d^2C}{dz^2} \right), \quad (2.25)$$

де  $x, y, z$  – координати.

Швидкість перенесення забруднювачів в атмосфері внаслідок молекулярної дифузії є низькою та становить не більше декількох десятків сантиметрів за секунду. Вона враховується тоді, коли відсутні переміщення мас повітря та вітер.

Турбулентна дифузія відбувається за рахунок руху маси атмосферного повітря та вітру. Вона приводить до переміщення частинок від зон більшого атмосферного тиску до зон меншого тиску.

Задача розрахунку і прогнозу перенесення забруднювачів в атмосфері розв'язується одночасно із задачею розрахунку і прогнозу метеорологічних елементів, що характеризують основні фізичні процеси в атмосфері. Ці дві задачі розв'язують на основі рівнянь балансу та рівнянь гідротермодинаміки, які є виразами основних законів фізики – збереження енергії, маси й кількості руху.

В найбільш загальному виді ці закони виражаються у формі рівняння загального балансу для атмосферних домішок

$$\frac{dC}{dt} + \frac{\partial(CV_a)}{\partial x} - \left( \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \epsilon_a, \quad (2.26)$$

де  $C$  - об'ємна концентрація домішок, що рівна

$$C = a \rho, \quad (2.27)$$

$a$  – кількість будь – якої субстанції в одиниці об'єму маси повітря;

$\rho$  - густина повітря;  
 $V_a$  – проекція власної швидкості домішки відносно повітря;  
 $K_x, K_y, K_z$  – коефіцієнти турбулентної дифузії;  
 $\epsilon_a$  – швидкість утворення або знищення субстанції в одиниці об'єму протягом часу  $t$ .

Повне розв'язання рівняння (2.26) можливе при відомих початкових і граничних умовах та є надзвичайно складною задачею. Для розрахунку поширення атмосферних домішок поблизу їх джерел використовують простіші емпіричні залежності.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

1. Назвіть основні фізичні параметри стану атмосфери.
2. Охарактеризуйте радіаційні процеси в атмосфері.
3. Розкрийте суть теплових режимів в атмосфері.
4. Наведіть параметри, якими характеризується водяна пара в атмосфері.
5. Назвіть основні параметри атмосферного тиску.
6. Поясніть причини руху атмосферного повітря.
7. Проаналізуйте суть перенесення забруднювачів в атмосфері.

## 3 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ПИЛУ

### 3.1 Фізичні основи технологічних процесів пиловловлювання

Технологічні процеси очищення газових викидів ґрунтуються на фізичних та хімічних властивостях забруднювачів та використанні основних фізичних закономірностей, внаслідок яких відбувається пиловловлювання. Видалення пиловидних частинок з газових потоків відбувається з використанням сухих та мокрих технологій очищення.

Удосконалення технологічних процесів та розробка нових мало- й безвідходних технологій шляхом створення безперервних замкнутих процесів, що дозволяють вловлювати й утилізувати газові відходи, базується на використанні одного або декількох механізмів осадження завислих в газах частинок. Основними механізмами осадження завислих частинок є дія сил гравітації, інерції, дифузії, відцентрових сил та сил зачеплення.

Осадження під дією сил гравітації (седиментація) обумовлене вертикальним осіданням частинок внаслідок дії сили ваги при переміщенні їх через газоочисний апарат.

Осадження під дією відцентрової сили відбувається при криволінійному русі аеродинамічного потоку, коли виникають відцентрові сили, під дією яких частинки пилу відкидаються на поверхню апарата.

Інерційне осадження відбувається у випадку, коли маса частинки або швидкість руху настільки незначні, що вона вже не може рухатися разом з газом по лінії течії, що охоплює перешкоду. Намагаючись за інерцією продовжувати свій рух, частинки пилу стикаються з перешкодою і осаджуються на ній.

Дифузійне осадження відбувається внаслідок того, що дрібні частинки пилу зазнають безперервної дії газів, які знаходяться в броунівському русі. В результаті цієї взаємодії відбувається осадження частинок на поверхні обтічних тіл або стінок пиловловлювача.

Осадження частинок за рахунок зачеплення спостерігається, коли відстань частинки, що рухається в газовому потоці, від обтічного тіла не перевищує її радіуса.

Крім основних механізмів осадження завислих частинок, в технологічних процесах очищення газових викидів враховують термофорез, дифузійфорез, фотофорез, вплив електричного й магнітного полів та радіометричних сил.

**Термофорез** – це відштовхування частинок нагрітими тілами. Відштовхування викликане силами, що діють на нерівномірно нагріті частинки аерозолів, які знаходяться в газоподібній фазі. Механізм цих сил суттєво залежить від відношення розміру частинки і середньої довжини вільного пробігу газових молекул.

**Дифузіофорез** – це рух частинки, що обумовлений градієнтом концентрації компонентів газової суміші, який проявляється в процесах випаровування та конденсації. Градієнт концентрації пару, що виникає при випаровуванні, є причиною гідродинамічної течії парогазової суміші, що впливає на осадження частинок.

**Фотофорез** – це рух частинок аерозолі, що освітлені з однієї сторони. Характер цього явища визначається розподіленням температур в освітлювальній частинці, яке залежить від форми і розміру частинок, прозорості та показника заломлення матеріалу. Якщо сторона, що звернена до світла, гарячіша, ніж зворотна, то частинка буде віддалятися від джерела світла.

В технологічному обладнанні для пиловловлювання в більшості випадків одночасно беруть участь в очищенні газового потоку декілька фізичних процесів. Але, частіше, тільки один з них є домінуючим при осадженні частинок певного типу. При проектуванні технологічних процесів і конструюванні газоочисного обладнання необхідно в першу чергу визначити тип речовини, що видаляється з газового потоку, її об'єм та параметри. Основними параметрами є швидкість газового потоку, температура й склад газів, природа компонентів, що вилучаються з газових викидів, та необхідний ступінь очищення.

### 3.2 Гравітаційне осадження частинок

Гравітаційне осадження застосовують для грубого очищення газових викидів від запилених частинок розміром 0,3...10 мм та більше.

Гравітаційне осадження (седиментація) відбувається внаслідок вертикального осідання частинок під дією сили ваги при проходженні їх через газоочисний апарат. При падінні частинка пилу знає опору середовища. Якщо знехтувати турбулентністю потоку та конвекційними течіями, то сила опору, що діє на частинку при її русі, можна визначити з рівняння

$$F = \xi S_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} V_{\text{ч}}^2 / 2, \quad (3.1)$$

де  $\xi$  - коефіцієнт опору, що залежить від критерію Рейнольдса, й визначається за формулою

$$R_e = V_{\text{ч}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{г}} / \mu_{\text{г}}, \quad (3.2)$$

де  $S_{\text{ч}}$  - площа перерізу частинки, що перпендикулярний напрямку руху, м<sup>2</sup>;

$V_{\text{ч}}$  - швидкість руху частинки, м/с;

$\rho_{\text{г}}$  - густина газу, кг/м<sup>3</sup>;

$d_{\text{ч}}$  - діаметр частинки, м;

$\rho_{\text{ч}}$  - густина частинок, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_{\text{г}}$  - динамічна в'язкість газів, Па·с.

Характер залежності коефіцієнта опору середовища визначається режимом руху кулеподібної частинки (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Значення коефіцієнтів опору середовища від режиму руху частинок

Режим руху частинки	Критерій Рейнольдса	Значення коефіцієнта опору середовища
Ламінарний	$Re \leq 2$	$\xi = 24 / Re$
Перехідний	$Re < 500$	$\xi = 18,5 / Re$
Турбулентний	$Re > 500$	$\xi = 0,44$

У випадку кульової форми частинки критерій Рейнольдса

$$R = V_{\text{ч}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{г}} / \mu_{\text{г}}, \quad (3.3)$$

де  $d_{\text{ч}}$  - діаметр частинки, м;

$\mu_{\text{г}}$  - динамічна в'язкість газів, Па·с.

При ламінарному режимі руху частинок сферичної форми опір середовища відповідно до закону Стокса становить

$$F = 3 \pi d_{\text{ч}} \mu_{\text{г}} V_{\text{ч}}. \quad (3.4)$$

У випадку, коли розмір частинок  $d_{\text{ч}} = 0,2 \dots 2,0$  мм, при визначенні опору середовища вводиться поправка, що враховує підвищену рухомість частинок, розмір яких адекватний середній довжині вільного пробігу газових молекул.

Тоді опір середовища руху частинки буде

$$F = 3 \pi d_{\text{ч}} \mu_{\text{г}} V_{\text{г}} / C_{\text{к}}, \quad (3.5)$$

де  $C_{\text{к}}$ - поправка за підвищену рухомість частинок, значення якої для повітря при нормальних умовах наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Поправка за підвищену рухомість частинок

Діаметр частинки $d_{\text{ч}}$ , мкм	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3	1,0	3,0	10,0
Поправка $C_{\text{к}}$	90,0	24,5	7,9	2,9	1,57	1,16	1,03	1,0

При відсутності опору середовища швидкість руху частинки під дією сили ваги буде змінюватися в залежності від часу, тобто за законом

$$V_{\text{ч}} = g_{\text{ч}} \tau_{\text{ч}}, \quad (3.6)$$

де  $\tau_{\text{ч}}$  – час осадження частинки,

$g_{\text{ч}}$  - прискорення частинки .

В зв'язку із збільшенням швидкості частинки ( $V_{\text{ч}}$ ) буде рости величина опору середовища ( $F$ ) і відповідно буде зменшуватися прискорення частинки ( $g_{\text{ч}}$ ). В результаті такого співвідношення сил частинка буде рухатися з постійною швидкістю. Величина цієї сталої швидкості визначається

з рівності сили ваги й сили опору середовища

$$3 \pi d_{\text{ч}} \mu_{\text{г}} \omega_{\text{в}} = (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) g_{\text{ч}} \pi d^3 / 6, \quad (3.7)$$

де  $\omega_{\text{в}}$  - швидкість витання (осадження) частинки, яка визначається із співвідношення (3.8)

$$\omega_{\text{в}} = g_{\text{ч}} d_{\text{ч}}^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) / 18 \mu_{\text{г}} = g_{\text{ч}} \tau_{\text{р}}, \quad (3.8)$$

де  $\tau_{\text{р}}$  - час релакції частинки.

Швидкість осадження (витання) частинки визначається з рівності опору середовища та сили ваги (див. 3.8)

Діаграма для визначення швидкості осадження частинок наведена на рис. 3.1.

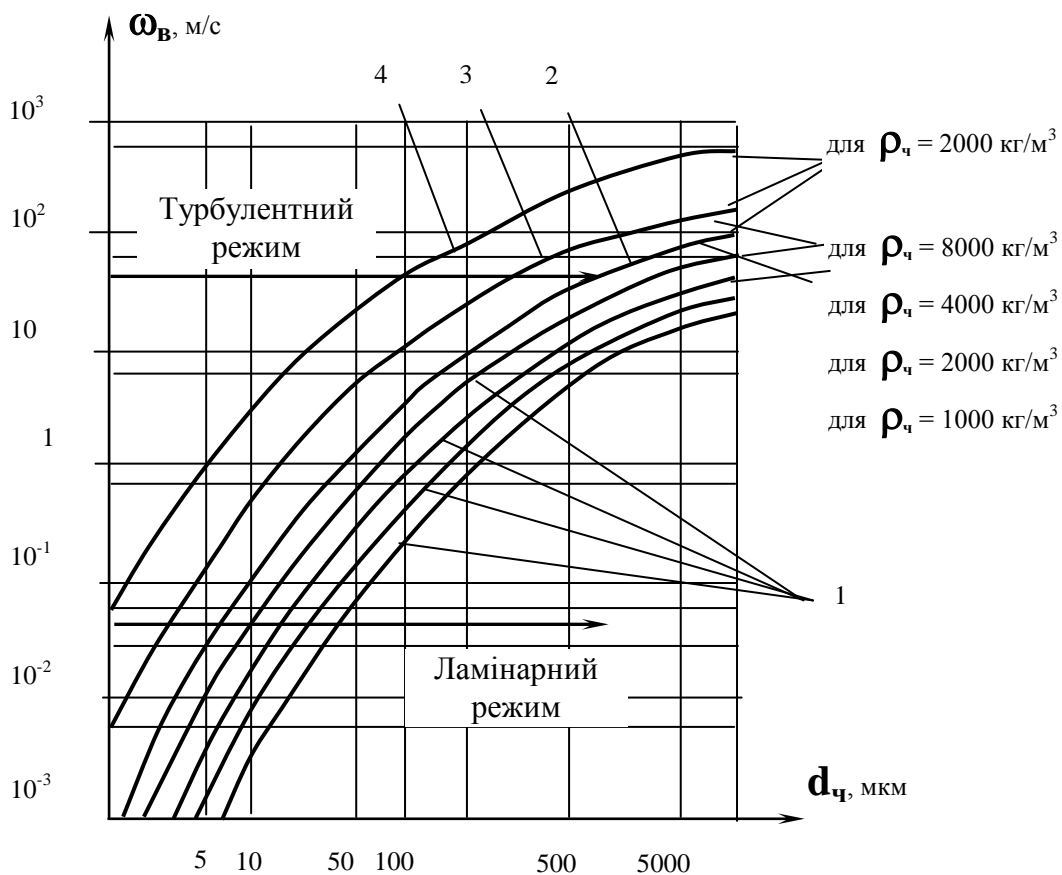


Рисунок 3.1 – Діаграма для визначення швидкості осадження

частинок в повітрі: 1 – під дією сили ваги;

2,3,4 – під дією сили, що перевищує силу ваги в 10, 100 та 1000 разів

### 3.3 Інерційне осадження частинок

Інерційне осадження частинок застосовують для грубого очищення

газових викидів від запылених частинок розмірами менше 25...30 мкм при швидкості руху газів 10...15 м/с.

Інерційне осадження відбувається за рахунок того, що при обтіканні твердого тіла запыленим потоком частинки, внаслідок великої інерції, продовжують рухатися поперек зігнутих ліній течії газів й осаджуються на поверхні тіла (рис. 3.2).

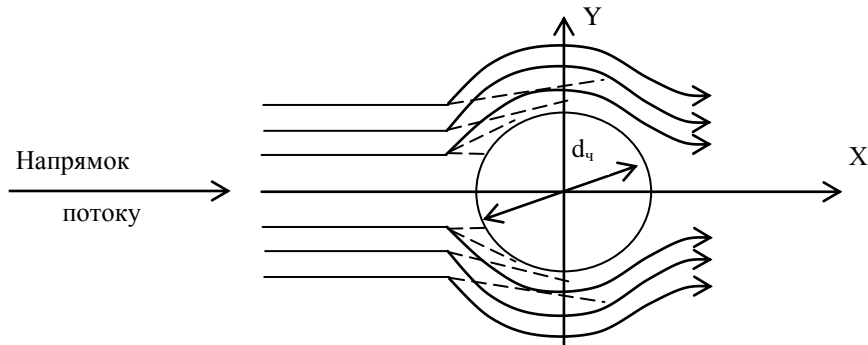


Рисунок 3.2 – Інерційне осадження частинок на кулі:  
— рух газів; - - - рух частинок

Коефіцієнт ефективності інерційного осадження визначається часткою частинок, видалених з потоку при обтіканні ними тіла.

Траєкторія руху частинок в газовому потоці описується рівнянням:

$$\rho_{\text{ч}} W_{\text{ч}} \frac{d\bar{\omega}_{\text{ч}}}{d\tau} = \rho_{\text{ч}} V_{\text{ч}} \frac{d\bar{V}_{\text{Г}}}{d\tau} + F_{\text{с}}, \quad (3.9)$$

де  $W_{\text{ч}}$  - об'єм частинки, м<sup>3</sup>;

$\tau$  - час руху, с;

$\rho_{\text{ч}}$  - густина частинки, кг/м<sup>3</sup>;

$\bar{\omega}_{\text{ч}}$ ,  $\bar{V}_{\text{Г}}$  - вектор швидкості, відповідно, частинки та газів в місці знаходження частинки, м/с;

$F_{\text{с}}$  - інерційна сила, яка діє на частинку.

Відношення інерційної сили, яка діє на частинку, до сили гідравлічного опору середовища характеризується інерційним параметром, яким є критерій Стокса:

$$S_{\text{tk}} = d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}} V_{\text{Г}} C_{\text{к}} / 18 \mu_{\text{Г}} 2 R, \quad (3.10)$$

де  $\mu_{\text{Г}}$  - динамічна в'язкість газу, Па·с;

$R$  - характерний розмір обтічного тіла, (радіус кулі або циліндра); м

$C_{\text{к}}$  - поправка, яка враховує підвищену рухомість частинок, розмір яких порівнюється з середньою довжиною вільного пробігу газових молекул.

Критерій Стокса чисельно рівний відношенню відстані, що проходить частинка з початковою швидкістю  $V_r$  при відсутності зовнішніх сил поки не зупиниться, до характерного розміру обтічного тіла, яким може бути діаметр кулі або циліндра. Відстань, що її проходить частинка, визначається за формулою

$$l_{\text{ч}} = d_{\text{ч}}^2 V_r \rho_{\text{ч}} / 18 \mu_r . \quad (3.11)$$

При стаціонарному русі газового потоку, коли частинки настільки малі, що для інерційної сили, яка діє на частинку, можна застосувати закон Стокса, рівняння (3.9) можна подати в вигляді

$$2S_{\text{tk}} \frac{d^2 \bar{\rho}}{d\tau_0^2} + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau_0} = \omega_0 , \quad (3.12)$$

де  $\bar{\rho}$  – безрозмірна координата частинки, тобто відношення радіус-вектора частинки ( $\bar{r}_{\text{ч}}$ ) до характерного розміру обтічного тіла ( $R$ );

$\omega_0$ - безрозмірна швидкість, що визначається як відношення вектора швидкості газів в місці знаходження частинки ( $\bar{V}_r$ ) до швидкості газів, які віддалені від обтічного тіла ( $\omega_{0б}$ );

$\tau_0$  - безрозмірний час, що рівний

$$\tau_0 = \omega_{0б} \tau / R . \quad (3.13)$$

Якщо частинка рухається на ділянці, де закон Стокса не можна застосувати, то в рівняння (3.12) вводиться поправка, яка враховує відношення дійсної сили опору до стоксівського опору,

$$\frac{48 S_{\text{tk}}}{\xi_{\text{ч}} R_{\text{еч}}} \frac{d^2 \bar{\rho}}{d\tau_0^2} + \frac{d\bar{\rho}}{d\tau} = \bar{\omega}_0 , \quad (3.14)$$

де  $\xi_{\text{ч}}$  – коефіцієнт, що залежить від критерію Рейнольдса для частинки ( $R_{\text{еч}}$ ),

$$R_{\text{еч}} = d_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} (\omega_{\text{ч}} - V_r) / \mu_r . \quad (3.15)$$

Аналіз рівняння (3.14) свідчить, що при  $S_{\text{tk}} = 0$ , коли частинки мають безмежно малу масу,

$$\bar{\omega}_0 = d\bar{\rho} / d\tau_0 . \quad (3.16)$$

Тобто, в цьому випадку частинка рухається точно за лінією течії і не дотикається до поверхні обтічного тіла. Таке явище також буде відбуватися при достатньо малих значеннях критерію Стокса.

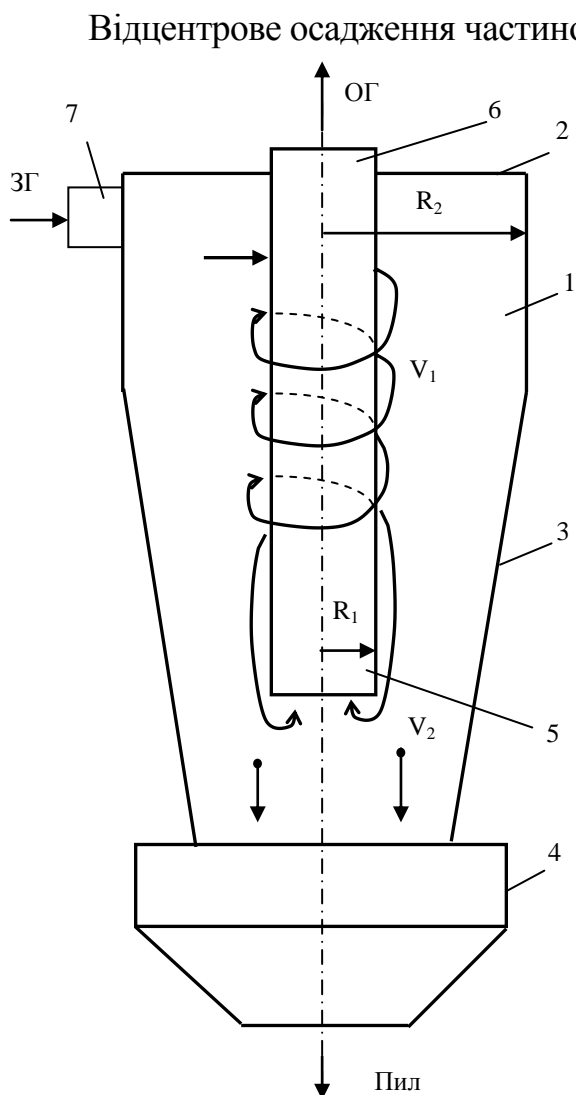
При певному мінімальному значенні критерію Стокса ( $S'_{\text{tk}}$ ) інерція частинки є достатньою, щоб перебороти збільшення швидкості її газовим потоком ( $S_{\text{tk}} > S'_{\text{tk}}$ ) і вона досягає поверхні обтічного тіла.



Аналізуючи процес інерційного осадження частинок на кулі (рис.3.2), можна дослідити вплив режиму руху газового потоку на інерційне осадження. При ламінарній течії потоку ( $Re < 2$ ) ефективність інерційного осадження не залежить від критерію Рейнольдса поки можна не враховувати існування прилеглого до обтічного тіла шару потоку (в'язке обтікання).

При переході до турбулентного руху потоку, що характеризується збільшенням значень критерію  $Re$ , на поверхні обтічного тіла утворюється прилеглий шар, товщина якого зменшується із збільшенням критерію  $Re$ . Якщо значення критерію Рейнольдса  $Re > 500$ , то лінії течії сильніше вигинаються (потенційне обтікання) і обтікають тіло на близькій відстані від нього. В результаті ефективність інерційного осадження частинок буде вища. Збільшення ефективності осадження буде продовжуватися із зменшенням товщини прилеглого (ламінарного) до тіла шару, тобто із збільшенням критерію Рейнольдса.

### 3.4 Відцентрове осадження частинок



Найбільше розповсюдження для очистки газів в промисловості отримали циклони. Виділення пилу в циклонах відбувається під дією відцентрових сил, що виникають внаслідок обертання газової течії в корпусі апарата. Основні частини циклону, незалежно від їх конструктивних особливостей, представлені на рис. 3.3.

Рисунок 3.3 – Циклон:

- 1 – циліндрична обечайка корпусу;
- 2 – кришка обечайки;
- 3 – конус корпусу;
- 4 – пілозбірник;
- 5 – центральна труба для відведення очищеного газу;
- 6 – патрубок центральної труби;
- 7 – тангенціальний патрубок для відведення газу.

Запилений газ надходить в циклон по тангенціальному патрубку 7, в результаті чого він отримує обертовий рух. Після виконання двох чи трьох обертів в кільцевій щілині між корпусом 1 та центральною трубою 5 виткоподібно опускається вниз. Причому в конусній частині 3 апарата внаслідок зменшення діаметра швидкість обертання течії збільшується ( $V_2 > V_1$ ). Під дією відцентрової сили частинки пилу відкидаються до стінок цикло-ну. Завдяки цьому основна маса пиловатих частинок зосереджується в течії газу, що рухається безпосередньо біля стінок апарата. Цей потік направ-ляється в нижню конічну частину корпуса 3. Частинки пилу при цьому потрапляють в пилосбірник 4. Очищений газ після виконання крутого роз-вороту по центральній трубі 5 виводиться з апарата.

Таким чином, в циклоні відбуваються складні аеродинамічні процеси, від досконалості яких залежить ефективність роботи цих апаратів.

При роботі циклона на частинку, що рухається в полі відцентрових сил, діють три складові: відцентрова, сила опору та сила ваги.

Відцентрова сила, що відкидає частинку до стінки циклона,

$$P_{\text{ц}} = (m \omega_{\text{т}}^2) / R, \quad (3.17)$$

сила опору руху частинки в радіальному напрямку

$$P_{\text{R}} = 3 \pi \omega_{\text{R}} d_{\text{ч}} \mu, \quad (3.18)$$

сила ваги частинки

$$P_{\text{g}} = m g, \quad (3.19)$$

де  $m$  - маса частинки, кг;

$\omega_{\text{т}}$  - тангенціальна складова швидкості частинки, м/с;

$R$  - радіус від центра до частинки, м;

$\omega_{\text{R}}$  - радіальна складова швидкості частинки, м/с;

$d_{\text{ч}}$  - діаметр частинки, м;

$\mu$  - густина середовища, Н·с/м<sup>2</sup> (в'язкість).

Частинка буде рухатися в радіальному напрямі, якщо виконується вимога

$$P_{\text{ц}} > P_{\text{R}}. \quad (3.20)$$

Нехтуючи силою тяжіння частинки, оскільки вона дуже мала, та ви-користовуючи рівняння (3.17) можна записати

$$(m\omega_{\text{т}}^2)/R = 3\pi \omega_{\text{R}} d_{\text{ч}} \mu. \quad (3.21)$$

Маса кулеподібної частинки:

$$m = \pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} / 6, \quad (3.22)$$

де  $\rho_{\text{ч}}$  - густина матеріалу частинок, кг/м<sup>3</sup>.

Швидкість руху частинки в радіальному напрямку, якщо підставити (3.21) в рівняння (3.20), дорівнює

$$\omega_{\text{R}} = (d_{\text{ч}}^2 \omega_{\text{Г}}^2 \rho_{\text{ч}}) / (18 \mu \text{R}) . \quad (3.23)$$

Необхідний час осідання частинки, що має подолати відстань  $(\text{R}_2 - \text{R}_1)$ , становить

$$\tau_{\text{ос}} = (\text{R}_2 - \text{R}_1) \omega_{\text{R}} = (9\mu (\text{R}_2^2 - \text{R}_1^2)) / (d_{\text{ч}}^2 \omega_{\text{Г}}^2 \rho_{\text{ч}}), \quad (3.24)$$

де  $\text{R}_1, \text{R}_2$  - відповідно радіуси центральної труби та циклона (рис. 3.3), м.

За другої умови, необхідний час осідання частинки:

$$\tau_{\text{ос}} = (2\pi \text{R} n') / \omega_{\text{Г}} , \quad (3.25)$$

де  $n'$  - число обертів, що робить частинка в циклоні ( $n' = 2 \dots 3$ ).

Із сумісного рішення рівнянь (3.23 та 3.24) визначають найменший діаметр частинок, які осідають в циклоні за час осідання  $\tau_{\text{ос}}$

$$d_{\text{min}} = 3 \sqrt{\frac{\mu(\text{R}_2 - \text{R}_1)}{\pi n' \rho_{\text{ч}} \omega_{\text{Г}}}} . \quad (3.26)$$

Ступінь вловлення частинок, діаметр яких ( $d_{\text{x}}$ ) менше мінімального ( $d_{\text{min}}$ ), дорівнює:

$$\eta_{\text{x}} = d_{\text{x}}^2 / d_{\text{min}}^2 . \quad (3.27)$$

Необхідний об'єм циклона для очищення об'єму газу за час  $\tau_{\text{ос}}$

$$W_{\text{ц}} = W_{\text{Г}} \tau_{\text{ос}} , \quad (3.28)$$

де  $W_{\text{Г}}$  - об'єм очищеного газу, м<sup>3</sup>/с.

Для оцінки ефективності роботи циклона використовують критерій Фруда

$$F_{\text{Г}} = \omega_{\text{Г}} / \text{R}_{\text{г}} . \quad (3.29)$$

Гідравлічний опір циклона дорівнює:

$$\Delta P_{\text{ц}} = \xi (\rho_{\text{г}} \omega_{\text{г}}^2) / 2 , \quad (3.30)$$

де  $\xi$  - коефіцієнт гідравлічного опору циклона;

$\rho_{\text{г}}$  - густина газів, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт гідравлічного опору для різних типів циклонів  $\eta = 4 \dots 25$ .

При збільшенні концентрації пилу в газовому потоці коефіцієнт гідравлічного опору циклона зменшується.

### 3.5 Дифузійне осадження частинок

Дифузійне осадження дрібних частинок на поверхні обтічних тіл або стінок апарата відбувається внаслідок того, що ці частинки зазнають безперервної дії молекул газу, які знаходяться в броунівському русі.

Переміщення частинок при дифузійному осадженні описується рівнянням Ейнштейна

$$\Delta x^2 = 2 D_{\text{ч}} T_{\text{г}} , \quad (3.31)$$

де  $\Delta x$  - величина зміщення частинок, м;

$D_{\text{ч}}$  - коефіцієнт дифузії частинки, що характеризує інтенсивність броунівського руху, м<sup>2</sup>/с;

$T_{\text{г}}$  - абсолютна температура газу, °К.

Коли розмір частинок ( $d_{\text{ч}}$ ) більший середнього шляху пробігу молекул ( $l_{\text{г}}$ ), тобто  $d_{\text{ч}} > l_{\text{г}}$ , коефіцієнт дифузії є функцією розміру частинок

$$D_{\text{ч}} = C_{\text{к}} K_{\text{Б}} T_{\text{г}} / 3\pi\mu_{\text{г}}d_{\text{ч}} , \quad (3.32)$$

де  $C_{\text{к}}$  - поправка, яка враховує підвищену рухомість частинок (табл. 3.2.);

$K_{\text{Б}}$  - постійна Больцмана, що рівна  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Коли розмір частинок ( $d_{\text{ч}}$ ) менший середнього шляху пробігу молекул ( $l_{\text{г}}$ ), тобто  $d_{\text{ч}} < l_{\text{г}}$ , коефіцієнт дифузії знаходиться за рівнянням Лангмюра

$$D_{\text{ч}} = \frac{4K_{\text{Б}} T_{\text{г}}}{3\pi d_{\text{ч}}^2 P_{\text{г}}} \sqrt{\frac{8R_{\text{г}} T_{\text{г}}}{\pi M_{\text{г}}}} , \quad (3.33)$$

де  $R_{\text{г}}$  - універсальна газова стала, рівна 8324 Дж/кмоль °К;

$P_{\text{г}}$  - абсолютний тиск газів, Па;

$M_r$  - маса однієї кіломолі, кг/кмоль.

Коефіцієнт дифузії входить в безрозмірний комплекс, що характеризує відношення сил внутрішнього тертя до дифузійних сил, цей комплекс характеризується критерієм Шмідта

$$S_c = \mu_r / \rho_r D_{ch} = \nu_r / D_{ch} , \quad (3.34)$$

де  $\nu_r$  - кінематична в'язкість,  $m^2/s$ .

Крім критерію Шмідта  $S_c$  в практиці дифузійних розрахунків використовують критерій Пекле  $Pe$ , що характеризує відношення конвекційних сил до дифузійних

$$Pe = Re S_c = V_r l / D_{ch} , \quad (3.35)$$

де  $V_r$  - швидкість газу, м/с;

$l$  – визначаючий лінійний параметр обтічного тіла.

Значення коефіцієнта дифузії частинок для нормальних умов, що обчислені за формулою (3.32), та значення критерію Шмідта  $S_c$  в залежності від розмірів частинок наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 - Значення коефіцієнта дифузії та критерію Шмідта

Розмір частинок, мкм	10	1,0	0,1
Коефіцієнт дифузії, $m^2/s$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$6,1 \cdot 10^{-10}$
Критерій Шмідта	$6,4 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^4$

Дані табл. 3.3 свідчать, що значення коефіцієнта дифузії різко збільшується із зменшенням розміру частинок. Швидкість дифузії навіть субмікронних частинок надто мала порівняно з швидкістю молекул газу. Це обумовлено тим, що коефіцієнт дифузії частинок на декілька порядків менший.

Розрахунок дифузійного осадження частинок виконують за формулами, що одержані при розгляданні процесів молекулярної дифузії.

Масову швидкість частинок (кг/с), що дифундують на кулю, обчислюють за формулами:

а) якщо критерій Рейнольдса  $Re < 3$  і критерій Шмідта  $S_c = 10^6$ , то

$$w_{ch} = \pi D_{ch} d_k C_{ch} Re^{1/3} S_c^{1/3} , \quad (3.36)$$

де  $d_k$  – діаметр кулі, м;

$C_{ch}$  – концентрація частинок в потоці,  $kg/m^3$ ;

б) якщо значення критеріїв  $Re = 600 \dots 2600$  і  $S_c = 10^6$ , то

$$w_{ch} = 0,8 \pi D_{ch} d_k C_{ch} Re^{1/3} S_c^{1/3} ; \quad (3.37)$$

в) якщо значення критеріїв  $Re = 100 \dots 700$  і  $S_c = 10^3$ , то

$$w_{\text{ч}} = 0,95 \pi D_{\text{ч}} d_{\text{k}} C_{\text{ч}} \text{Re}^{1/2} S_{\text{с}}^{1/3} . \quad (3.38)$$

Ефективність дифузійного осадження частинок при обтіканні газовим потоком кулі розраховують за формулою

$$\eta_{\text{D}} = 2 \sqrt{2} / (\text{P}_{\text{с}} d_{\text{k}})^{1/2} , \quad (3.39)$$

де  $\text{P}_{\text{с}}$ - критерій Пекле.

Ефективність дифузійного осадження на циліндрі обчислюють за формулами:

а) при в'язкому обтіканні циліндра

$$\eta_{\text{D}} = 2,92 / ((2 - \ln \text{Re})^{1/3} \text{P}_{\text{с}}^{2/3}), \quad (3.40)$$

в) при потенційному осадженні

$$\eta_{\text{D}} = 3,19 / \text{P}_{\text{с}} . \quad (3.41)$$

Аналіз формул (3.39 –3.41) свідчить, що ефективність дифузійного осадження частинок обернено пропорційна розмірам частинок та швидкості газового потоку.

### 3.6 Осадження частинок за рахунок зачеплення

Важливе значення при захоплюванні частинок за рахунок дотику поверхні обтічного тіла має їх розмір. Осадження частинки відбувається тоді, коли її траєкторія не пересікається з поверхнею обтічного тіла, а також у випадку проходження лінії течії на відстані від поверхні тіла, що рівна її радіусу. Тобто, коли відсутнє інерційне осадження, то ефективність зачеплення вища нуля.

Ефект зачеплення характеризується параметром

$$\mathbf{R} = d_{\text{ч}} / d_{\text{т}} , \quad (3.42)$$

де  $d_{\text{ч}}$ ,  $d_{\text{т}}$  –відповідно, діаметр частинок і обтічного тіла.

При потенційному обтіканні тіла, коли величина параметра  $\mathbf{R}$  настільки мала, що можна знехтувати силами інерції, ефективність зачеплення становить: при обтіканні кулі  $\eta_{\text{R}} = 3\mathbf{R}$ , а при обтіканні циліндра  $\eta_{\text{R}} = 2\mathbf{R}$ .

У випадку, коли за рахунок суттєвого значення інерційних ефектів траєкторії осідаючих частинок прямолінійні, ефективність зачеплення складає: при обтіканні кулі  $\eta_{\text{R}} = 2\mathbf{R}$ , а при обтіканні циліндра  $\eta_{\text{R}} = \mathbf{R}$ .

Таким чином, при потенційному обтіканні кулі ефективність механізму зачеплення знаходиться в межах  $(2...3)\mathbf{R}$ , а при потенційному обтіканні циліндра –  $(1...2)\mathbf{R}$ .

Ефективність осадження частинок за рахунок дотику при в'язкому обті-

канні циліндра визначається за формулами:

$$\eta_R = R^2 / (2 - \ln Re) , \quad (3.43)$$

$$\eta_R = R^2 Re^{0,0625} . \quad (3.44)$$

Аналіз рівнянь (3.43, 3.44) свідчить, що ефект зачеплення стає суттєвим при осадженні частинок на сферах з малим діаметром. Осадження частинок за рахунок зачеплення значною мірою визначається режимом течії газового потоку і не залежить від швидкості газів.

### 3.7 Ефективність очищення газів від пилу

Очищення повітря від пилу за ефективністю є грубе, середнє та тонке. Грубе очищення передбачає затримання максимальної кількості пилу (в процентах до початкового вмісту пилу) і, головним чином, пилу великих фракцій (200 мкм та більше). Таке очищення використовують як попереднє для запиленого повітря при багатоступеневому очищенні. При середньому очищенні затримується пил, що містить дрібні фракції (10... 100 мкм). В цьому випадку початкова концентрація не повинна перевищувати 150...200 мг/м<sup>3</sup>, а кінцева – 30...50 мг/м<sup>3</sup>. Тонке очищення характеризується необхідністю вловлювання пилу (менше 10мкм) й доведенням остаточної концентрації пилу до 1...2 мг/м<sup>3</sup>. Початковий вміст пилу не повинен перевищувати 3...5 мг/м<sup>3</sup>.

Ступінь очищення (коефіцієнт корисної дії) є відношенням кількості вловленого матеріалу до кількості матеріалу, який надійшов в газоочисний апарат з газовим потоком за певний період часу. Розрізняють загальний ступінь очищення повітря від пилу, який відноситься до всієї маси частинок, та фракційний ступінь очищення для кожної фракції окремо.

Загальний ступінь очищення є відношенням маси пилу, що вловлена в апараті, до маси пилу, що надійшла до нього за один і той же період часу

$$\eta_3 = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100\% = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100\% ; \quad (3.45)$$

де  $G_1$  та  $G_2$  – масові витрати частинок пилу, що вміщуються в газах, які, відповідно, надходять в апарат і виходять з нього, кг/с;

$C_1$  та  $C_2$  - концентрації частинок пилу в газах, що, відповідно, надходять в апарат і виходять з нього, кг/м<sup>3</sup>.

В випадку, коли спостерігається зміна об'єму газу за рахунок підсмоктування, ефективність очищення становить

$$\eta_n = 1 - K_n (C_2/C_1) ; \quad (3.46)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт підсмоктування.

Ефективність очищення для частинок пилу різних розмірів неоднакова. Якщо відомий фракційний вміст пилу

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \dots + \Phi_n = 100\% ; \quad (3.47)$$

де  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  - процентний вміст пилу даної фракції;

то доцільно коефіцієнт очищення газів визначати за фракційною ефективністю, тобто ступенем очищення газів від частинок визначеного розміру.

Фракційний ступінь очищення:

$$\eta_\Phi = [\Phi_{\text{вх}} - \Phi_{\text{вих}} (1 - \eta)] ; \quad (3.48)$$

де  $\Phi_{\text{вх}}, \Phi_{\text{вих}}$  - вміст фракцій в газах, відповідно, на вході та виході апарата, %.

Знаючи фракційний ступінь очищення газів  $\eta_{\Phi 1}, \eta_{\Phi 2}, \dots, \eta_{\Phi n}$ , загальну ефективність очищення газів визначають за формулою:

$$\eta_z = \frac{\eta_{\Phi 1} \cdot \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{\Phi 2} \cdot \Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_{\Phi n} \cdot \Phi_n}{100} . \quad (3.49)$$

Технологічна схема очищення газів від пилу буває одноступенева та багатоступенева. Одноступенева – якщо необхідний ефект очищення досягається в одному пиловловлювачеві. В випадку, коли ефект одноступеневого очищення недостатній, установлюють послідовно декілька типів пиловловлювачів. Сумарний ступінь очищення газів декількох послідовно встановлених апаратів визначається за формулою:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_n) , \quad (3.50)$$

де  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  - ступінь очищення газів від пилу в першому, другому і n-му апараті.

З санітарної точки зору важлива не частка вловлювання пилу  $\eta$ , а частка пропущеного, що виражається у вигляді коефіцієнта проскоку:

$$P = 1 - \eta ; \quad (3.51)$$

Кінцевий вміст пилу ( $C_2$ ) в повітрі, що виходить з апарата, встановлений гранично-допустимою концентрацією пилу в робочій зоні примі-



щення (табл. 3.4).

**Таблиця 3.4 - Допустимий вміст пилу в повітрі, що викидається в атмосферу з пилоочисного апарата**

Гранично-допустима концентрація пилу в повітрі робочої зони приміщення, мг/м <sup>3</sup>	до 2	2...4	4...6	більша 6
Допустима концентрація пилу в повітрі, що викидається в атмосферу	30	60	80	100

### 3.8 Технологічне обладнання для очищення газів від пилу

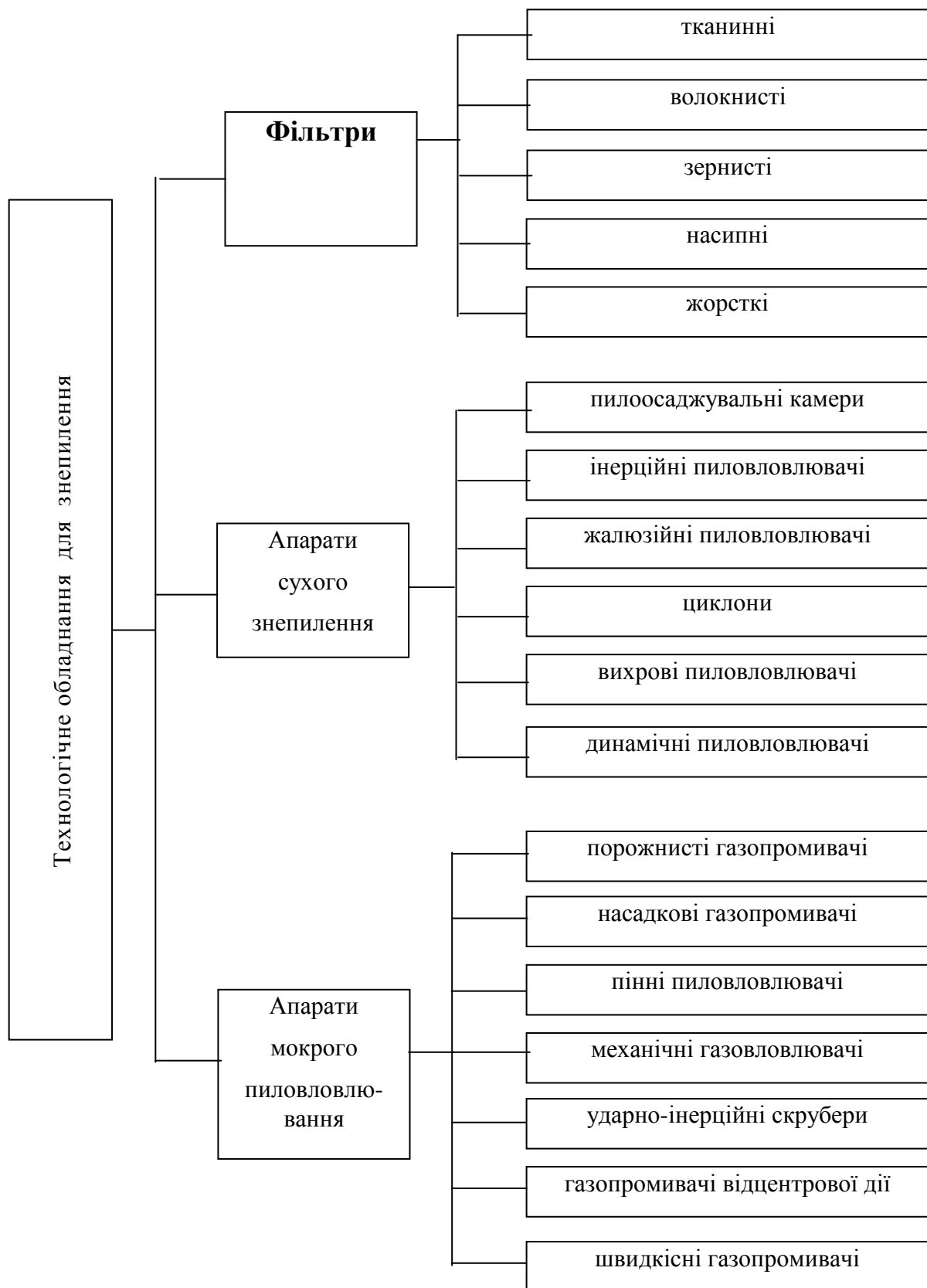
Видалення частинок пилу з газових потоків з використанням гравітаційного, інерційного, відцентрового й дифузійного осадження та за рахунок зачеплення реалізується технологічним обладнанням для сухого або мокрого пиловловлювання, класифікація якого наведена на рис. 3.4.

Класифікація пиловловлювачів за їх ефективністю в залежності від дисперсності пилу наведені в табл. 3.5.

**Таблиця 3.5 - Класифікація пиловловлювачів за їх ефективністю**

Клас пиловловлювачів	Розміри частинок, що ефективно вловлюються, мкм	Нижня границя ефективності в залежності від дискретності пилу	
		група дискретності пилу	ефективність, %
I	більше 0,3...0,5	V – дуже дрібнодисперсний IV - дрібнодисперсний	< 80 99,9...80
II	більше 2	IV - дрібнодисперсний III - середньодисперсний	92...85 99,9...92
III	більше 4	III - середньодисперсний II - великодисперсний	99...80 99,9...99
II	більше 8	II - великодисперсний I – дуже великодисперсний	99,9...85 > 99,9
I	більше 9	I – дуже великодисперсний	> 99,9

Характеристика видів технічного обладнання для знепилення, область найбільш доцільного його використання в залежності від дискретності пилу та опір наведені в табл. 3.6.



**Рисунок 3.4 – Класифікація технологічного обладнання для сухого й мокрого очищення газів від пилу**

Таблиця 3.6 - Характеристика видів пиловловлювачів

Вид пиловловлювача	Тип пиловловлювача	Клас пиловловлювача за ефективністю	Область найбільш доцільного використання за групами дисперсності пилу					Опір <sub>2</sub> кг/м <sup>2</sup>	
			I	II	III	IV	V		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Гравітаційне осадження	пилоосаджувальні камери	V	+	+	-	-	-	20	
Інерційне осадження	циклони	IV	-	+	+	-	-	200	
	відцентрові скрубери	IV	-	+	+	-	-	100	
	ударно-інерційні скрубери	III	-	-	+	-	-	120	
	струйні ротоклони	II	-	-	+	+	-	350	
	швидкісні газопромивачі Вентурі		III	-	-	+	-	-	135
			II	-	-	+	-	-	350
I			-	-	-	+	+	1000	
Фільтрація за рахунок зачеплення	тканинні фільтри	V	+	-	-	-	-	80	
Інерційне й дифузійне осадження	волокнисті фільтри	III	+	+	-	-	-	60	
		II	-	-	+	+	-	150	
		I	-	-	-	+	+	250	
Дифузійне та інерційне осадження	порожнисті, насадкові та пінні пиловловлювачі	II	-	-	+	+	-	200	

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗНАТЬ

1. Проаналізуйте фізичні основи технологічних процесів пиловловлювання.
2. Поясніть, як відбувається гравітаційне осадження частинок пилу.
3. Розкрийте суть інерційного осадження частинок пилу.
4. Наведіть схему руху газових потоків в циклоні.
5. Проаналізуйте роботу циклона з позицій сил, що діють на частинку в газовому потоці при відцентровому осадженні.
6. Поясніть, чим визначається час осідання частинок в циклоні та ступінь їх вловлювання.
7. Розкрийте суть дифузійного осадження частинок.
8. Наведіть параметри, що визначають ефективність дифузійного осадження.
9. Охарактеризуйте осадження частинок за рахунок зачеплення.
10. Проаналізуйте ефективність очищення газів від пилу.
11. Наведіть класифікацію технологічного обладнання для очищення газів від пилу.
12. Дайте характеристику видів пиловловлювачів.

## 4 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ГАЗО- Й ПАРОПОДІБНИХ ЗАБРУДНЕНЬ АБСОРБЦІЙНИМ МЕТОДОМ

### 4.1 Суть абсорбційного методу очищення газових викидів

У викидах технологічних газів крім твердих частинок знаходяться шкідливі газо- й пароподібні речовини, до яких відносяться оксиди та діоксиди сірки, азоту, вуглецю, сірководень, хлор, хлористий водень тощо. З метою санітарного очищення цих шкідливих викидів та використання напівфабрикатів, що вловлюються, для одержання кислот, сірки, добрив та інших цінних продуктів застосовують такі фізико-хімічні та хімічні методи, як абсорбція, адсорбція, термічний та каталітичний.

Абсорбційні методи очищення газів ґрунтуються на властивості рідин розчиняти гази. В процесі абсорбції беруть участь дві фази - рідка та газова.

Абсорбція - фізико-хімічний процес вибіркового поглинання газів рідиною з утворенням розчинів. Десорбція - процес виділення газу з рідини. Речовину, яка міститься в газовій фазі й при абсорбції переходить в рідку, називають абсорбційним компонентом або абсорбтивом. Речовину, яка міститься в газовій фазі й при абсорбції не переходить в рідку, називають газом-носієм або інертним газом.

Абсорбент (поглинач) - речовина, в якій відбувається розчинення абсорбуючих компонентів газу, що очищається.

Абсорбер - апарат, в якому відбувається процес абсорбції.

Абсорбцію підрозділяють на фізичну та хімічну (хемосорбцію). При фізичній абсорбції відбувається фізичне розчинення абсорбовного компонента в розчині, що не супроводжується хімічною реакцією. Абсорбція відбувається в випадку, якщо парціальний тиск абсорбовного компонента в газовій фазі більше його рівноважного парціального тиску компонента над даним розчином. Чим більша різниця між цими тисками, тим більша рухома сила процесу й тим швидше відбувається абсорбція.

Для багаторазового використання абсорбент (поглинач) регенерують фізичними методами: підвищенням температури, зниженням тиску або сукупністю цих параметрів.

Якщо компонент, що поглинається, не має ніякої цінності або процес регенерації дуже трудомісткий, то поглинач використовують декілька разів і після відповідної обробки скидають в каналізацію. Це не є оптимальним рішенням, оскільки забруднює водне середовище. Метод, що поєднує абсорбцію з десорбцією, дозволяє не тільки добувати корисні компоненти з газових систем й знизити до мінімуму витрати абсорбента, але й відповідає вимогам захисту довкілля.

В якості поглинальних розчинів при фізичній абсорбції використовують воду, а також органічні й неорганічні розчини, які не вступають в

хімічну реакцію з абсорбувальними компонентами. Ефективність добування компонента з газової суміші при фізичній абсорбції підвищують використанням принципу протитоку з безперервною подачею в абсорбер свіжого розчину.

При хемосорбції абсорбувальний компонент вступає в хімічну реакцію з поглиначем, утворюючи нові хімічні з'єднання в рідкій формі. При цьому можливі два варіанти – протікання оборотних і необоротних реакцій. В обох випадках рівноважний парціальний тиск компонента, від якого очищається газ, значно нижчий в порівнянні з фізичною абсорбцією. В зв'язку з цим хемосорбційні процеси при рівних умовах з фізичною абсорбцією забезпечують повніше добування компонентів з газових сумішей. Регенерацію поглинальних розчинів виконують фізичними й хімічними методами. Фізичні методи використовують при протіканні оборотних хемосорбційних процесів, а хімічні – необоротних хемосорбційних процесів.

Як поглинальні розчини в процесі хемосорбції використовують водні розчини солей та органічних розчинників. Поглинальні розчини повинні мати високу поглинальну спроможність й селективність по відношенню до компонента, який добувається, бути термічностійкими й спроможними до регенерації, не викликати корозію апаратів та мати невисоку ціну.

Універсальних поглинальних розчинів, що однаковою мірою задовольняють всі вимоги, в практиці абсорбційного очищення газових викидів не існує. В кожному конкретному випадку вибирають абсорбент, який відповідає головним критеріям оптимізації, що можуть бути різними для різних процесів. Як поглинальні розчини використовують водні розчини лугів, кислот, солей, спиртів та органічних розчинників. Поглинальний розчин повинен мати незначну в'язкість та температуру кипіння більшу, ніж води (150°C і більше).

Оптимальні умови процесів абсорбційного очищення газів забезпечуються відповідним співвідношенням між концентраціями речовин, що беруть участь в абсорбційному процесі, в момент рівноваги, та швидкістю, з якою така рівновага встановлюється.

## 4.2 Рівновага в системі газ-рідина

Для вибору оптимальних умов процесу очищення газових викидів від газо- й пароподібних забруднень абсорбційними методами необхідно розглянути з позицій термодинаміки співвідношення між концентраціями рідкої й газової фаз, що встановлюються протягом суттєвого часу дотику фаз. Рівновага визначається термодинамічними властивостями компонента, що добувається, й поглинального розчину та залежить від концентрації, температури й тиску фаз.

Склад газової й рідкої фаз виражається такими величинами:

об'ємна концентрація:  $C$ , кмоль/м<sup>3</sup> або  $\bar{C}$ , кг/м<sup>3</sup>;

мольна частка для газової фази:  $y$ , мольн. частки,  $\bar{y}$ , масової частки;  
 мольна частка для рідкої фази:  $x$ , мольн. частки,  $\bar{x}$ , масової частки;  
 відносна концентрація для газової фази:  $Y$ , кмоль/кмоль,  $\bar{Y}$ , кг/кг;  
 відносна концентрація для рідкої фази:  $X$ , кмоль/кмоль,  $\bar{X}$ , кг/кг;  
 парціальний тиск компонента для газової фази:  $P_H$ , Па.

Зв'язок між зазначеними величинами визначається такими формулами.

Парціальний тиск компонента:

$$P_H = Y, \quad (4.1)$$

або 
$$P_H = \bar{C} \cdot R \cdot T / M_K. \quad (4.2)$$

Парціальний тиск інертного газу:

$$P_0 = P(1 - y). \quad (4.3)$$

Об'ємна концентрація:

$$C = C / M_K. \quad (4.4)$$

Мольна частка компонента:

$$y = \bar{C} \cdot R \cdot T / P \cdot M_K, \quad (4.5)$$

$$\bar{y} = \bar{C} \cdot R \cdot T / P \cdot M_r. \quad (4.6)$$

Відносна концентрація компонента:

$$y = \bar{C} / (P / R \cdot T) M_K - \bar{C}. \quad (4.7)$$

Середня мольна маса:

для газової фази

$$M_r = M_{ог} \left[ 1 - \frac{R \cdot T}{P} \left( \sum \frac{\bar{C}}{M_K} - \sum \frac{\bar{C}}{M_{ог}} \right) \right]; \quad (4.8)$$

для рідкої фази:

$$M_p = \frac{\rho_p}{\left( \sum \frac{\bar{C}}{M_K} + \frac{\rho_p - \sum \bar{C}}{M_{оп}} \right)}, \quad (4.9)$$

де  $P$  – загальний тиск, Па;

- $M_k$  – мольна маса компонента;  
 $M_g, M_{op}$  – мольні маси носія в газовій та рідких фазах;  
 $T$  – температура, °K;  
 $R$  – універсальна газова стала;  
 $\rho_p$  – густина рідин, кг/м<sup>3</sup>.

При абсорбції перехід компонента з газової фази в рідку продовжується до тих пір, поки парціальний тиск компонента в газовій фазі стане рівним тиску цього компонента над розчином.

Стан рівноваги між концентрацією газу в газовій та рідкій фазах характеризується константою фазової рівноваги (коефіцієнтом розподілу), яка рівна відношенню концентрації компонента в газовій фазі до його концентрації в рідкій фазі. В залежності від способу вираження концентрації в газовій і рідкій фазах константа фазової рівноваги має такий вигляд:

$$m_c = C_g^* / C_p, \quad (4.10)$$

$$m_{yx} = y^* / x, \quad (4.11)$$

$$m_{px} = p^* / x, \quad (4.12)$$

$$m_{yc} = p^* / C, \quad (4.13)$$

$$m_{p\bar{c}} = y^* / \bar{C}. \quad (4.14)$$

Позначення з зірочкою відносяться до рівноважних концентрацій компонентів, а індекси при константі фазової рівноваги відносяться: перший – до одиниць концентрації газової фази; другий – до одиниць концентрації рідкої фази. Якщо одиниці вимірювання концентрацій в газовій і рідкій фазах однакові, то ставиться один індекс, а константа фазової рівноваги безрозмірна. В решті випадків константа фазової рівноваги має розмірність.

Співвідношення між константами фазової рівноваги при різних способах вираження складу фаз наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Співвідношення між константами фазової рівноваги

Величина	$m_c$	$m_{yx}$	$m_{px}$	$m_{pc}$	$m_{p\bar{c}}$
$m_c$	–	$m_{yx} \frac{M_p \cdot P}{\rho_p \cdot R \cdot T}$	$m_{px} \frac{M_p \cdot P}{\rho_p \cdot R \cdot T}$	$\frac{m_{pc}}{R \cdot T}$	$m_{\bar{c}} \frac{M_k}{R \cdot T}$
$m_{yx}$	$m_c \frac{\rho_z \cdot R \cdot T}{M_p \cdot P}$	–	$\frac{m_{px}}{P}$	$m_{pc} \frac{\rho_p}{M_p \cdot P}$	$m_{p\bar{c}} \frac{\rho_p \cdot M_k}{P \cdot M_p}$

$m_{px}$	$m_c \frac{\rho_p \cdot R \cdot T}{M_p}$	$m_{yx} \cdot P$	—	$m_{pc} \frac{\rho_p}{M_p}$	$m_{pc} \frac{\rho_p \cdot M_k}{M_p}$
$m_{pc}$	$m_c \cdot R \cdot T$	$m_{yx} \frac{M_p \cdot P}{\rho_p}$	$m_{px} \frac{M_p}{\rho_p}$	—	$m_{pc} \cdot M_k$
$m_{pc}^-$	$m_c \frac{R \cdot T}{M_k}$	$m_{yx} \frac{M_p \cdot P}{\rho_p \cdot M_k}$	$m_{px} \frac{M_p}{\rho_p \cdot M_k}$	$\frac{m_{px}}{M_k}$	—

Значення константи фазової рівноваги між рідкою й газовою фазами при абсорбційних процесах очищення газових викидів для водних розчинів деяких газів при різних температурах наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Значення константи фазової рівноваги для водних розчинів газів

Газ	Константа фазової рівноваги $m_{px} \cdot 10^{-4}$ , кПа при температурах							
	0	10	20	30	40	60	80	100
Водень	587	645	693	739	761	775	765	755
Азот	536	677	815	936	1060	1210	1280	1270
Повітря	424	556	672	782	881	1020	1110	1090
Кисень	257	332	405	486	556	638	857	710
Метан	227	301	380	455	527	635	691	710
Оксид вуглецю	356	448	543	628	705	834	857	857
Діоксид вуглецю	7,37	10,6	14,4	18,8	23,6	—	—	—
Оксид азоту	171	220	268	314	358	424	453	460
Діоксид азоту	9,86	14,3	20	25,9	—	—	—	—
Сірководень	2,70	3,70	4,80	6,17	7,55	10,4	13,7	14,3
Хлор	2,72	3,96	5,36	6,70	8,0	9,75	9,73	—



Ацетилен	7,33	9,74	12,3	14,8	-	-	-	-
----------	------	------	------	------	---	---	---	---

Рівновагу в системі газ-рідина використовують для побудови залежності рівноважної та робочої ліній на діаграмі залежності мольних часток між газовою й рідкою фазою компонента (X-Y). Вони разом з рівнянням матеріального балансу використовуються для розрахунків технологічних процесів абсорбції.

### 4.3 Кінетика процесу абсорбції

При відсутності рівноваги між фазами відбувається перехід речовини з однієї фази в іншу. Швидкість цього процесу виражається рівнянням масопередачі

$$U = K_y F \Delta C_{cp} , \quad (4.15)$$

де  $U$  - маса речовини, що переходить з газової фази в рідку за одиницю часу, кг/год;

$K_y$  - поверхневий коефіцієнт масопередачі (коефіцієнт абсорбції), кг/м<sup>2</sup>·с·Па;

$F$  - площа поверхні дотику фаз, м<sup>2</sup>;

$\Delta C_{cp}$  - середня рухома сила процесу, Па.

Процес масопередачі відбувається в дві стадії. Спочатку відбувається перенесення речовини з газової фази до поверхні дотику фаз, а потім від поверхні розділення в рідку фазу. Відповідно з цим коефіцієнти масопередачі, що віднесені до концентрації газу ( $K_y$ ) або до концентрації рідини ( $K_x$ ), можуть визначатися через коефіцієнти масовіддачі

$$1/K_y = 1/\beta_y + m/\beta_x , \quad (4.16)$$

або

$$1/K_x = 1/m\beta_y + 1/\beta_x , \quad (4.17)$$

де  $\beta_y$ ,  $\beta_x$  - коефіцієнти масовіддачі в газовій та рідкій фазах;

$m$  - константа фазової рівноваги.

Загальний опір дифузії масопередачі в рівнянні (4.16) представлений як сума опорів дифузії газової ( $1/\beta_y$ ) та рідкої ( $m/\beta_x$ ) фаз. За аналогією в рівнянні (4.17) доданок ( $1/m\beta_y$ ) характеризує опір газової фази, а доданок ( $1/\beta_x$ ) – рідкої фази. Аналіз рівнянь (4.16) та (4.17) свідчить, що загальний опір масопередачі залежить не тільки від коефіцієнтів масовіддачі  $\beta_x$  та  $\beta_y$ ,

але й значною мірою визначається константою фазової рівноваги.

Для газів, що добре розчиняються ( $m < 1$ ), опір рідкої фази ( $m/\beta_x$ ) незначний, тому ним можна знехтувати. Тоді відношення коефіцієнта масо-передачі до концентрації газу  $K_y \approx \beta_x$ . Для газів, що погано розчиняються ( $m > 100$ ), опір рідкої фази ( $m/\beta_x$ ) є значним в порівнянні з опором газової фази ( $1/\beta_y$ ). В цьому випадку можна знехтувати опором в газовій фазі, а  $K_y \approx m \beta_x$ . Якщо константа фазової рівноваги  $m = 1 \dots 100$ , то гази розчиняються задовільно. При визначенні  $K_y$  необхідно враховувати коефіцієнти масовіддачі в газовій ( $\beta_y$ ) та рідкій ( $\beta_x$ ) фазах. Добре розчиняється у воді аміак і хлористий водень, погано розчиняється діоксид вуглецю і задовільно розчиняється діоксид сірки.

Якщо рухома сила процесу абсорбції виражена в об'ємних концентраціях, то зв'язок між коефіцієнтами масовіддачі для газової фази  $\beta_g$  та для рідкої фази  $\beta_p$  з відповідними коефіцієнтами, коли рухома сила процесу виражена в мольних частках  $\beta_y$  та  $\beta_x$ , такий:

для газової фази

$$\beta_y = \beta_g P / R T, \quad (4.18)$$

для рідкої фази

$$\beta_x = \beta_p^2 / M_p, \quad (4.19)$$

де  $M_p$  – середня мольна маса для рідкої фази;

$P$  – загальний тиск.

Значення коефіцієнтів масовіддачі  $\beta_y$  та  $\beta_x$ , визначають експериментально, використовуючи критеріальні рівняння типу

$$N_u = A' Re^n P_r^m \Gamma^d, \quad (4.20)$$

де  $N_u = \beta_y \ell / D$  - критерій Нуссельта;

$Re = \omega \ell / \nu$  - критерій Рейнольдса;

$P_r = \nu / D$  - дифузійний критерій Прандтля;

$\Gamma$  - симплекс геометричної подібності;

$A', n, m, d$  - коефіцієнти, значення яких визначається експериментальним шляхом;

$\ell$  - лінійний розмір;

$\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості;

$\omega$  - швидкість газу;

$D$  - коефіцієнт дифузії.

Об'ємні витрати поглинальної рідини розраховують з рівняння матеріального балансу процесу абсорбції. Суть балансу полягає в тому, що маса поглиненого компонента, яка виділена з очищеного газу, повинна бути рівна масі цього компонента, яка перейшла в рідину

$$M_k = Q_g (K_{y1} - K_{y2}) = Q_p (K_{x2} - K_{x1}), \quad (4.21)$$

де  $M_k$  - маса поглиненого компонента, яка виділена з очищеного газу, г/с;

$Q_g$  - об'ємні витрати очищеного газу, м<sup>3</sup>/с;

$Q_p$  - об'ємні витрати поглинальної рідини, м<sup>3</sup>/с;

$K_{y1}, K_{y2}$  - початкова та кінцева концентрації газоподібного компонента в очищеному газі, г/м<sup>3</sup>;

$K_{x1}, K_{x2}$  - початкова та кінцева концентрації газового компонента в поглинальній рідині, г/м<sup>3</sup>.

Необхідна площа поверхні дотику газу з рідиною рівна

$$F = 10^3 M / K_a \Delta C_{cp} \quad (4.22)$$

де  $K_a$  - поверхневий коефіцієнт масопередач (коефіцієнт абсорбції), кг/м<sup>2</sup>·с·Па;

$\Delta C_{cp}$  - середня рухома сила процесу, Па.

Коефіцієнт абсорбції характеризує швидкість розчинення газового компонента в рідині та визначається загальним опором дифузії цього компонента через газову й рідинну плівки. Для добре розчинних газів значення коефіцієнта абсорбції визначається емпірично за формулою

$$K_a = \frac{53,7 \cdot 10^6 M \omega_g^{0,75} (0,0011T - 0,18)^{0,25}}{(13,7 + \sqrt{\omega_g}) d_e^{0,25}}, \quad (4.23)$$

де  $M$  – молекулярна маса компонента, що поглинається, кг;

$\omega_g$  - швидкість газу у вільному перерізі абсорбера, м/с;

$T$  - абсолютна температура газу, °К;

$d_e$ - еквівалентний діаметр насадки, рівний збільшеному вчетверо значенню живого перерізу насадки, поділеного на її питому поверхню, м.

Середня рухома сила процесу абсорбції рівна різниці парціального тиску компонента, що поглинається в газовій фазі, та рівноважного парціального тиску цього компонента над поглинальною рідиною. Для підрахунку середньої рухомої сили абсорбції знаходять середнє арифметичне, виходячи з її значень на вході й виході з абсорбера. Якщо ці величини відрізняються більше як в два рази, то в залежності від характеру руху фаз в апараті користуються одним із рівнянь для підрахунку середньої логарифмічної величини:

для прямого току

$$\downarrow\downarrow \Delta C_{cp} = \frac{(y_n - y_k^*) - (y_k - y_k^*)}{\ln((y_n - y_n^*) / (y_k - y_k^*))} ; \quad (4.24)$$

для протитоку

$$\downarrow\uparrow \Delta C_{cp} = \frac{(y_n - y_k^*) - (y_k - y_n^*)}{\ln((y_n - y_k^*) / (y_k - y_n^*))} ; \quad (4.25)$$

для перехресного току

$$\downarrow \Delta C_{cp} = \frac{(y_n - y_n^*) - (y_n - y_k^*)}{\ln((y_n - y_n^*) / (y_n - y_k^*))} - \frac{y_n - y_k}{2} , \quad (4.26)$$

де  $y_n, y_k$  - мольні концентрації компонента в газовій фазі на вході в абсорбер та на виході;

$y_n^*, y_k^*$  - мольні рівноважні концентрації компонента над розчином на вході в абсорбер та на виході.

Мольна частка компонента в газовій суміші:

$$y = \bar{C} R T / P M_k , \quad (4.27)$$

де  $\bar{C}$  - об'ємна концентрація, кг/м<sup>3</sup>;

$R$  - універсальна газова стала;

$T$  - температура, °К;

$P$  - тиск, Па;

$M_k$  - мольна маса компонента.

Рухому силу процесу абсорбції можна виразити через число одиниць переносу

$$\Delta C_{cp} = (y_n - y_k) / N_{ог} , \quad (4.28)$$

$$\Delta C_{cp} = (x_n - x_k) / N_{оп} , \quad (4.29)$$

де  $N_{ог}$  ,  $N_{оп}$  – число одиниць переносу, що віднесено, відповідно, до концентрації газу та рідини, які визначають за формулами

$$N_{ог} = K_y F / G_o , \quad (4.30)$$

$$N_{оп} = K_x F / L_o , \quad (4.31)$$

де  $G_o$  та  $L_o$  - витрати газової та рідкої фаз, кг/год.

Зв'язок між величинами  $N_{ог}$  та  $N_{оп}$  описується рівнянням

$$N_{оп} = N_{ог} (m / l_o) , \quad (4.32)$$

де  $l_o = L_o / G_o$ , тобто відношення витрат рідкої фази до газової.

Загальне число одиниць переносу визначають за формулою

$$1 / N_{ог} = 1 / n_y + m G_o / l_o n_x , \quad (4.33)$$

де  $n_y$ ,  $n_x$  - число одиниць переносу, відповідно, в газовій та рідкій фазах, що їх обчислюють за допомогою рівнянь

$$n_y = \beta_y F / G_o , \quad (4.34)$$

$$n_x = \beta_x F / L_o . \quad (4.35)$$

Для визначення числа одиниць переносу використовують методи графічного або числового інтегрування та графічний. Графічний метод дозволяє отримати задовільні результати і є найменш трудомістким. Для визначення числа переносу графічним методом будують діаграму  $y-x$  (рис.4.1), на яку наносять робочу лінію АВ та лінію рівноваги ОС.

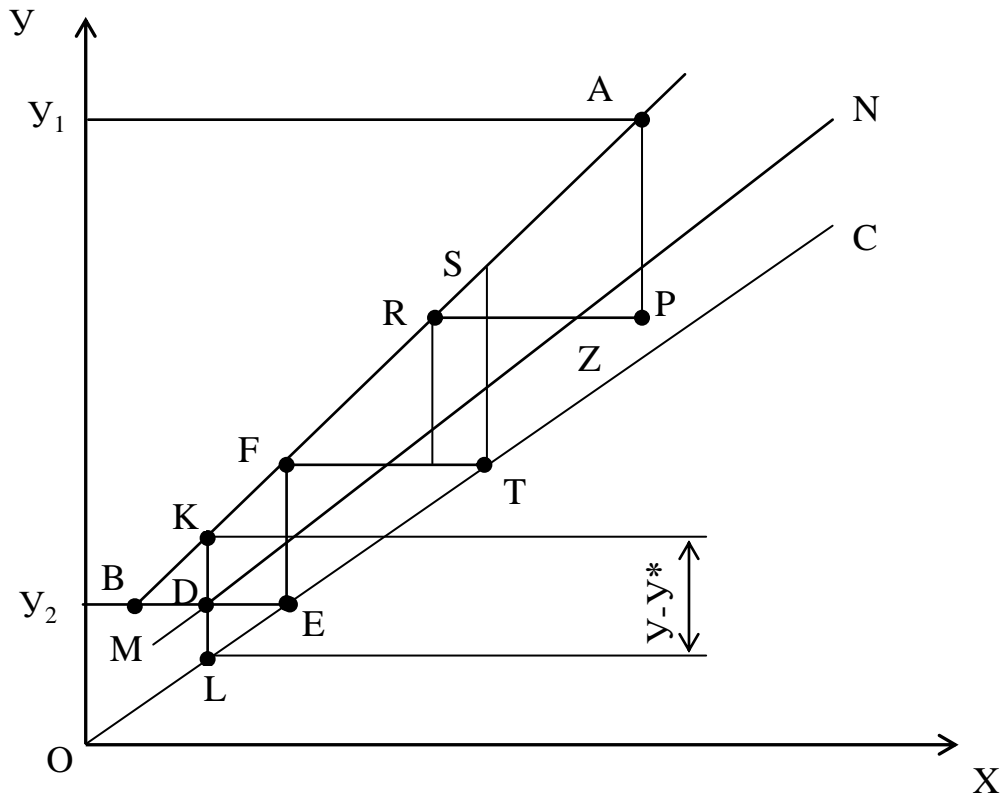


Рисунок 4.1 - Визначення числа одиниць переносу графічним методом

На графіку проводять середню лінію MN, що проходить через точки, які ділять навпіл відрізки ординат між робочою лінією AB та лінією рівноваги OC. Потім з точки B, що характеризує кінцевий стан газу, проводять лінію BD до перетину з середньою лінією NM і продовжують її до перетину з лінією рівноваги OC. Отримують точку E. Причому відрізок BD дорівнює відрізку DE. Потім з точки E будують перпендикуляр EF до осі OX до перетину з робочою лінією AB і відмічають точку F. Причому дотримується вимога  $EF = 2 KD = KL$ . Відрізок EF відображає зміну концентрації газу, що відповідає одній одиниці переносу (сходинок BEF).

Продовжуючи аналогічну побудову сходинок до початкового стану газу (точка A), визначають число одиниць переносу. Якщо в кінці побудови отримують неповну сходинок ( $PZ < RZ$ ), то її приймають за повну сходинок, або розраховують точно так, як відношення відрізків  $AP : ST$ . Графічний метод дозволяє точно виконати розрахунок числа одиниць переносу, якщо лінія рівноваги OC не сильно відрізняється від прямої.

Геометричні параметри абсорберів (діаметр й висота) та їх кількість визначаються необхідною площею взаємодії фаз

$$F = S_a H_a a , \quad (4.36)$$

де  $S_a$  – площа перерізу абсорбера,  $m^2$ ;

$H_a$  - висота абсорбера, м;

$a$  - питома поверхня контакту фаз,  $m^2/m^3$ .

Для збільшення питомої поверхні контакту газу з рідиною в різних типах абсорберів використовують насадки, тарілки, механічні перемішувачі та розпилювачі рідини.

#### 4.4 Технологічне обладнання для абсорбційного очищення газових викидів

Очищення газових викидів від газо- й пароподібних забруднень абсорбційним методом реалізується за допомогою технологічного обладнання, класифікація якого наведена на рис.4.2.

Насадковий абсорбер представляє собою колону, що заповнена насадкою. В насадкових абсорберах контакт газу з рідиною відбувається в основному на змоченій поверхні насадки, по якій стікає зрошувальна рідина. Рух газорідинних потоків в насадкових абсорберах відбувається, як правило, протитоком. Гідравлічний режим і ефективність роботи абсорбера визначаються типом насадки та способом її укладання.

Для заповнення корпусу абсорбера використовують кільцеву насадку (кільця Лессінга, Палля, Рашіга), у вигляді сідла (сідла Берля, Інталоке), хордову, плоскопаралельну, плаваючу й блочну насадку. Питома поверхня контакту фаз в цих насадках становить  $a = 50 \dots 500 m^2/m^3$ , а еквівалентний діаметр  $d_e = 0,006 \dots 0,06 m$ .

Суттєво впливає на ефективність роботи насадкових абсорберів рівномірність розподілу рідини та газу поперечному перерізу апарата. Рідина по насадці стікає у вигляді плівок, потоків й крапель. На відміну від газів, вона нерівномірно розподіляється по фронту насадок. Тому рідину попередньо рівномірно розподіляють по торцях насадки за допомогою зрошувальних пристроїв.



Рисунок 4.2 - Класифікація технологічного обладнання для абсорбційного очищення газових викидів



Інтенсивність масообміну, допустима швидкість газу й гідравлічний опір насадки визначаються кількістю утримуваної на насадці рідини, величина якої залежить від типу насадки. В залежності від щільності зрошення (6...12 м/год) й швидкості газового потоку (0,5...1,0 м/с) гідродинамічні режими насадкових абсорберів наступні: плівковий, підвішування й емульгування. Плівковий режим характеризується незначними навантаженнями по газу й рідині. Режим підвішування настає, коли при збільшенні швидкості висхідного потоку газу швидкість стікання рідини по насадці зменшується. При цьому режимі відбувається накопичення рідини в місцях контакту насадки і збільшується кількість рідини, що утримується. Режим емульгування відбувається внаслідок значного накопичення рідини в насадці. Газ не проходить суцільним потоком, а барботує через рідину, що накопичилась в насадці. Цей режим відповідає максимальній ефективності насадкових колон, оскільки збільшується поверхня контакту фаз за рахунок утворення бульбашок.

Принцип роботи барботажних абсорберів ґрунтується на проходженні (барботажі) бульбашок газу через шар рідини. Поверхня масообміну в барботажних абсорберах, де рідина є суцільною фазою, а газ – дисперсною, еквівалентна сумарній поверхні бульбашок газу або піни, що утворюється при барботажі. Бульбашкова поверхня масообміну утворюється плаваючою насадкою або за допомогою тарілок, які в залежності від способу організації руху газу й рідини бувають перехресного типу, прямоструминні й протиструминні. Для збільшення ступеню очищення газу використовують апарати, в яких по висоті встановлюють декілька ступенів.

В залежності від конструкції тарілок й швидкості проходження газу розрізняють три гідродинамічні режими роботи барботажних абсорберів: бульбашковий, пінний та потоковий. Бульбашковий (барботажний) режим характеризується швидкостями газу 0,3...0,4 м/с, який рухається через шар рідини у вигляді окремих бульбашок. Поверхня масообміну при цьому порівняно невелика і залежить від діаметра бульбашок газу, що проходять через шар рідини. При збільшенні швидкості проходження газу до 0,5...3,0 м/с барботажний режим переходить в пінний. Внаслідок інтенсивного подрібнення потоку на мілкі бульбашки й потоки утворюється суцільний шар піни. Під дією газового потоку відбувається відрив рідини з утворенням дрібних крапель й плівок. Утворюється розвинута поверхня масообміну, що збільшує продуктивність й ефективність роботи абсорберів. При подальшому збільшенні швидкості газу розмір бульбашок й потоків збільшується і пінний режим переходить в потоковий. Він характеризується утворенням значної кількості великих крапель й плівок, що приводить до різкого збільшення поверхні масообміну, тобто інтенсифікації процесу очищення газів. При поточковому режимі суцільною фазою є газ, а рідина розпилюється на краплі.

Принцип роботи розпилювальних абсорберів ґрунтується на розпиленні рідини в потоці газу. Суцільною фазою в цих абсорберах є газовий потік, а диспергивною – рідина. Поверхня масообміну рівна сумарній поверхні крапель, потоків й плівок, що утворюються в апараті при розбризкуванні рідини. За способом утворення міжфазної поверхні розпилювальні абсорбери бувають форсункові, швидкісні пряموструминні та ударної дії.

Міжфазова поверхня в форсункових абсорберах формується за рахунок розпилювання рідини в апараті за допомогою форсунок. Рух фаз може бути прямоструминним, протиструминним або перехресним з радіальним, тангенціальним або осьовим введенням газу. За механізмом подріблення струменя рідини на краплі форсунки є механічні, пневматичні та з обертовим робочим органом. Ефективність подрібнення рідини на краплі визначається швидкістю витікання струменів.

В прямоструминних розпилювальних абсорберах розпилення рідини відбувається за рахунок енергії газового потоку. За способом утворення міжфазової поверхні швидкісні прямоструминні розпилювальні абсорбери бувають двох типів. В абсорберах першого типу розпилювання відбувається за рахунок енергії газу при плівковому, струминному або форсунковому підведенню рідини. В газопромивачах другого типу рідина розпилюється за рахунок енергії газу при ударі газового потоку в поверхню рідини.

Інтенсивність масообміну в швидкісних пробивачах типу труб Вентурі обумовлюється не тільки розвинутою поверхнею контакту фаз, але й великими швидкостями конвентивної (турбулентної) дифузії. Швидкість руху газу в горловині швидкісного абсорбера досягає 50...150 м/с. Чим більша швидкість, тим більш тонке диспергування рідини досягається, а значить зростає поверхня масопередачі. При швидкості газу в горловині 150 м/с утворюються краплі рідини розміром 50 мкм.

Апаратами, в яких поверхня масообміну утворюється при ударі газового потоку в поверхню рідини, є скрубери Дойля та ротоклопи. В цих апаратах, коли газ ударяється в поверхню рідини, він її змінює і утворює розвинуту поверхню масообміну. Інтенсивність сепарації зпіненої рідини збільшується встановленням в апараті перегородок, що змінюють напрямок руху газів.

В механічних абсорберах інтенсивність масообміну досягається за допомогою обертового розпилювального ротора. Обертвий ротор розміщується горизонтально або вертикально. При обертанні вертикального вала рідина під дією відцентрової сили тонкою плівкою піднімається по внутрішній поверхні конусних елементів і, падаючи з кромки, подрібнюється на мілкі краплі. Утворюється густа завіса крапельної рідини. Забруднений газ проходить через цю завісу і очищається. В апаратах з горизонтальним розміщенням вала розбризкування рідини виконується лопатями або дисками, що розміщені на обертовому валу. Інтенсивність розпилення в них рідини менша, ніж в попередніх апаратах.

Різноманітністю пінних абсорберів є циклонно-пінні апарати. Наявність тангенціального підведення та висока швидкість руху газів (до 7 м/с) забезпечують значний турбулентний режим взаємодії фаз, що збільшує ефективність очищення газів. Циклонно-пінні апарати зібрали в собі переваги циклонних (відцентрові сили газового потоку) й пінних (значна поверхня контакту фаз, що безперервно поповнюється) апаратів.

Для інтенсифікації абсорбційних процесів використовуються фізичні методи взаємодії та створюються принципово нові конструкції апаратів. Фізичними методами інтенсифікації очищення газових викидів абсорбційним методом є збільшення поверхні контакту фаз шляхом тонкого диспергування струменів рідини або газу, збільшення швидкості руху взаємодійних потоків, поверхнева конвенція й турбулентність, вібрація, пульсація, накладання електромагнітних, електростатичних, ультразвукових полів тощо.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

1. Охарактеризуйте абсорбційний метод очищення газових викидів.
2. Поясніть суть рівноваги в системі газ - рідина.
3. Які співвідношення між константами фазової рівноваги при різних способах вираження складу фаз?
4. Дайте характеристику кінетики процесу абсорбції.
5. Наведіть рівняння матеріального балансу процесу абсорбції.
6. Охарактеризуйте середню рухому силу процесу абсорбції.
7. Як визначаються числа одиниць переносу?
8. Наведіть класифікацію технологічного обладнання для абсорбційного очищення газових викидів.
9. Поясніть принцип роботи барботажних абсорберів.
10. Розкрийте суть роботи насадкових абсорберів.
11. Охарактеризуйте принцип роботи розпилювальних абсорберів.
12. Наведіть особливості циклонно-пінних й розпилювально-вихрових абсорберів.

## 5 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ГАЗО- Й ПАРОПОДІБНИХ ЗАБРУДНЕНЬ АДСОРБЦІЙНИМ МЕТОДОМ

### 5.1 Суть адсорбційного методу очищення газових викидів

Перспективним методом очищення газів від газо- й пароподібних забруднень є адсорбція – тобто процес розділення, що ґрунтується на властивості деяких твердих тіл вибірково поглинати газоподібні компоненти з газової суміші. Молекули забруднювального газу або пари, що є в газовій суміші, сорбуються на поверхні або в порах твердого тіла.

Адсорбатив – речовина, що поглинається з газової суміші.

Адсорбент – тверда речовина, на поверхні або в порах якої відбувається адсорбція речовини, що поглинається.

Адсорбат – компонент, що перейшов із суміші газів в адсорбативний стан.

Адсорбційний метод очищення газових викидів доцільно використовувати, коли необхідний ефект не можна отримати іншими методами. Цей метод доцільний також, коли концентрація домішок, що видаляються з газу-носія, дуже мала та необхідна гарантія рекуперації домішок, оскільки вони мають значну вартість.

Явище адсорбції обумовлено наявністю сил притягування між молекулами адсорбенту та адсорбативу на межі розподілу фаз, що дотикаються. Процес переходу молекул адсорбативу з газу-носія на поверхневий шар адсорбенту відбувається в тому випадку, коли сили притягання адсорбенту перевищують сили притягання, що діють на адсорбатив з сторони молекул газу-носія.

Молекули адсорбованої речовини, коли переходять на поверхню адсорбенту, зменшують його енергію. Внаслідок цього відбувається виділення теплоти. В залежності від сили притягання адсорбенту адсорбція може бути фізична або хімічна. Теплота фізичної адсорбції складає до 60 КДж/мол., а хімічної – від 20 до 400 КДж/мол.

При фізичній адсорбції взаємодія молекул з поверхнею адсорбенту визначається порівняно слабкими дисперсійними, індукційними та орієнтаційними силами. При цьому адсорбовані молекули не вступають з молекулами адсорбенту в хімічну взаємодію та зберігають свою індивідуальність. Для фізичної адсорбції характерна висока швидкість, незначна міцність зв'язку між поверхнею адсорбенту й адсорбативом та мала теплота адсорбції. При підвищенні температури кількість фізично адсорбованої речовини зменшується, а підвищення тиску призводить до збільшення величини адсорбції. Висока швидкість фізичної адсорбції та властивість адсорбентів до регенерації дозволяють проводити процес циклічно в умовах

зворотності, тобто з ротацією стадій поглинання та виділення компонента, що добувається.

Перевагою фізичної адсорбції є зворотність процесу. При пониженні тиску адсорбенту в газовій суміші або при підвищенні температури адсорбовані молекули легко десорбують без зміни хімічного складу, а регенований адсорбент може використовуватися багаторазово.

В основі хімічної адсорбції лежить хімічна взаємодія між адсорбентом та речовиною, що адсорбується. Діючі при цьому сили значно більші, ніж при фізичній адсорбції. Через значну теплоту адсорбції (до 400 кДж/моль) енергія зв'язку хемосорбних молекул сильно відрізняється від енергії зв'язку цих же молекул в потоці газу.

Відповідно енергія, яка необхідна для того, щоб хемосорбована молекула прореагувала з молекулою іншого сорту, може бути суттєво меншою, ніж енергія, що необхідна для реакції цих молекул в газовій фазі. В зв'язку з цим адсорбована на поверхні твердого тіла молекула легко вступає в хімічну реакцію з іншими молекулами. Молекули адсорбативу, що вступили в хімічну взаємодію, добре утримуються на поверхні та в порах адсорбенту. При хімічній адсорбції її швидкість при низьких температурах мала, але збільшується з ростом температури.

Твердий шар продуктів реакції, що утворюються при адсорбції, є найбільшим з усіх дифузійних опорів при перенесенні. Якщо швидкість процесу хемосорбції лімітується дифузією адсорбату в кулеподібній частинці, то кінетичне рівняння має вигляд

$$1 - (2\alpha/3) - (1 - \alpha)^{2/3} = k'(1/r^2) \tau \quad (5.1)$$

де  $\alpha$  – ступінь адсорбції;

$k$  – коефіцієнт, що залежить від природи реагуючих речовин;

$r$  – початковий радіус частинок;

$\tau$  – час адсорбції.

Фізична та хімічна адсорбція часто супроводжують одна одну. При очищенні газів від газо- й пароподібних забруднень найбільш поширена фізична адсорбція.

## 5.2 Рівновага й швидкість адсорбції

Характер протікання процесу адсорбції може бути періодичним або безперервним. Періодичні процеси відбуваються при нерухомому шарі адсорбенту, а безперервні – при рухомому чи киплячому шарі.

Розглянемо випадок, коли в нерухомому шарі адсорбату безперервно рухається потік газу-носія з визначеною початковою концентрацією речовини, що поглинається. Через деякий відрізок часу на фронтальній ділянці шару адсорбату внаслідок різного падіння рухомої сили поглинання адсо-

рбативу припиняється. Потік забруднених газів “проскакує” через цю ділянку шару адсорбенту без зміни концентрації. Зона поглинання забруднювачів зміщується на наступні ділянки. Час роботи шару адсорбенту до повного насичення його фронтальної ділянки в періодичному процесі адсорбції називається періодом формування фронту адсорбції ( $\tau_{\phi}$ ). Після насичення фронтального шару зона адсорбції переміщується по висоті шару адсорбенту. При цьому концентрація адсорбтиву в зоні адсорбції міняється плавно і на виході із шару вона рівна нулю. З моменту закінчення виходу з шару адсорбенту газу з нульовою концентрацією, що відповідає початку “проскакування”, завершується час адсорбційної або захисної дії шару.

Кількість адсорбтиву, що поглинається шаром адсорбенту даної довжини до моменту початку “проскакування” адсорбтиву, називається динамічною активністю або динамічною ємністю адсорбенту. Ця величина може вимірюватися не тільки кількістю рідини, що поглинається, але й проміжком часу між початком поглинання до моменту “проскакування”. Час дії захисного шару визначається з рівняння

$$\tau_{зд} = kH_{ш} - \tau_0 \quad (5.2)$$

де  $k$  – коефіцієнт захисної дії шару;

$H_{ш}$  – висота шару адсорбенту;

$\tau_0$  – втрата часу захисної дії шару, яка обумовлена тим, що формування фронту відбувається не раптово.

Залежність часу захисної дії від висоти (довжини) шару в період формування фронту  $\tau_{зд} = f(H_{ш})$  описується плавною кривою (рис. 5.1), що в період паралельного перенесення фронту адсорбції переходить в пряму лінію.

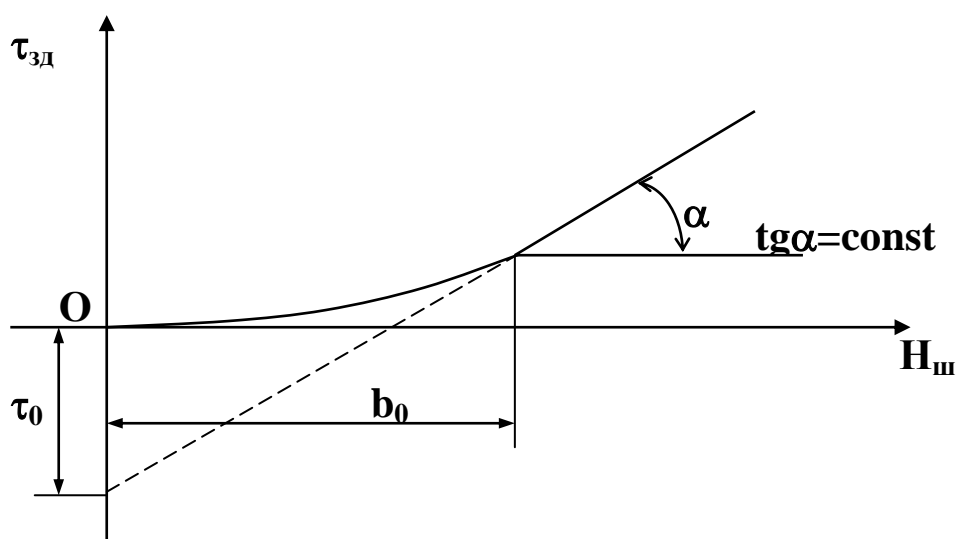


Рисунок 5.1 - Залежність часу захисної дії від висоти шару адсорбенту  $\tau_{зд} = f(H_{ш})$

Тангенс кута нахилу до осі абсцис прямолінійного відрізка кривої (рис. 5.1) дорівнює коефіцієнту захисної дії шару адсорбенту ( $\text{tg}\alpha=k$ ). Відрізок, що його відсікає продовження цієї прямої на осі ординат ( $\tau_{зд}$ ), відповідає величині втрати часу захисної дії шару адсорбенту ( $\tau_0$ ).

Після початку “проскакування” шар адсорбенту ще має властивість адсорбувати адсорбент, але його концентрація на виході з шару при переміщенні фронту адсорбції поступово збільшується. Коли фронт адсорбції досягне верхніх шарів адсорбенту, шар повністю втрачає властивість адсорбувати і концентрація адсорбенту на виході й вході стає однакою.

Кількість речовини, що поглинається адсорбентом, коли шар повністю втрачає властивість адсорбувати й концентрація адсорбенту на вході та виході стає однакою, називається статичною активністю або статичною ємністю. Статична ємність визначає стан рівноваги, коли кількість адсорбованих молекул рівна кількості молекул, що виходять з адсорбенту. Динамічна ємність адсорбенту менше статичної, тому процес адсорбції розраховують за динамічною ємністю адсорбенту.

Стан рівноваги залежить від природи адсорбенту та адсорбтиву, концентрації адсорбтиву в газі-носії, температури процесу, тиску й вологості адсорбенту. Процес адсорбції в умовах рівноваги графічно зображується ізотермою адсорбції, що показує зв'язок між кількістю речовини ( $a'$ ), яка поглинена одиницею маси або об'єму адсорбтива в газовій фазі ( $P$ ) при постійній температурі процесу. Існує п'ять типів фізичної адсорбції (рис. 5.2). Ізотерма типа (а) відповідає мономолекулярній ленгмюровській адсорбції, а типів (б) та (в) - мономолекулярній й полімолекулярній адсорбції. Ізотерми (г) та (д) характеризують випадки, коли мономолекулярна й полімолекулярна адсорбції супроводжуються капілярною конденсацією.

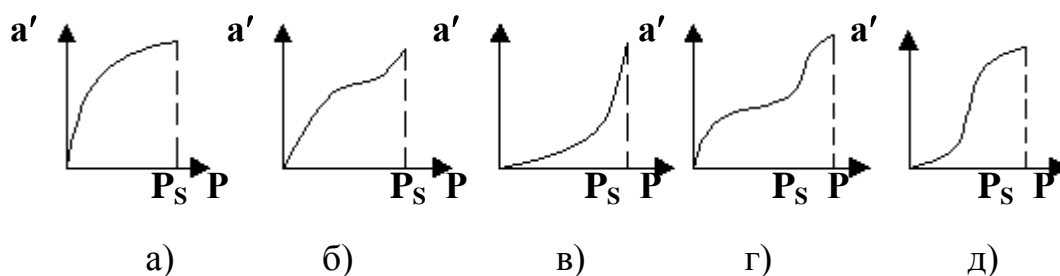


Рисунок 5.2 - Типи ізотерм процесу адсорбції

Ізотерми (б) та (в) відрізняються від ізотерм (г) та (д) тим, що перші дві відображають зміщення адсорбції при наближенні концентрації до насиченого стану ( $P_s$ ), ізотерми (г) та (д) свідчать, що максимальна адсорбція досягається при менших значеннях ( $P_s$ ).

Швидкість процесу адсорбції зменшується з підвищенням температури, що графічно відображає ізобара адсорбції (рис. 5.3). Вона показує зміну кількості адсорбованої речовини в залежності від температури при

постійному тиску.

При підвищенні концентрації адсорбтиву над поверхнею адсорбенту при сталій температурі активність адсорбенту збільшується. Це збільшення продовжується тільки до певного моменту, коли досягається повне насичення адсорбенту, тобто коли досягається максимальна поглинальна ємність адсорбенту.

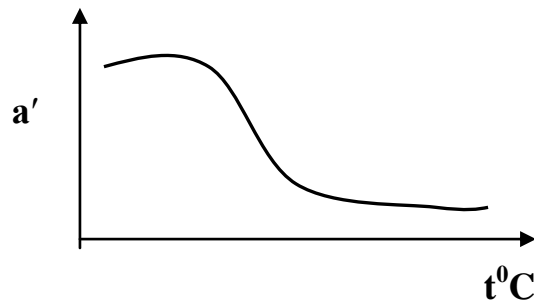


Рисунок 5.3 - Ізобара процесу адсорбції

Швидкість процесу адсорбції визначається швидкістю підведення адсорбтиву до зовнішньої поверхні гранул адсорбенту або швидкістю переміщення адсорбтиву в порах адсорбенту чи від цих двох параметрів. Швидкість підведення адсорбтиву до зовнішньої поверхні адсорбенту залежить від швидкості газу-носія, температури, коефіцієнта дифузії адсорбтиву в газі-носії, в'язкості та щільності середовища. Швидкість переміщення адсорбтиву в середині гранул залежить від їх розмірів, діаметра пор, розмірів молекул адсорбтиву, температури тощо.

### 5.3 Характеристика адсорбентів

Всі тверді речовини з розвинутою поверхнею є потенціальними адсорбентами. Для очищення газів використовують адсорбенти з добре розвинутою внутрішньою поверхнею, утворення якої досягається в процесі їх синтезу або в результаті спеціальної обробки.

Адсорбенти повинні відповідати таким вимогам: мати значну динамічну ємність, велику питому поверхню, вибірковість адсорбції, термічну й механічну стійкість до регенерації, бути простими в виготовленні та дешевими. Для адсорбційного очищення газів використовують активоване вугілля, силікагелі, цеоліти, глинисті мінерали, пористе скло тощо.

Основні властивості адсорбентів - це адсорбтивна ємність (активність); пориста структура адсорбенту, що характеризується поверхнею адсорбенту, об'ємом та розміром пор; вибірковість адсорбенту.

Статична та динамічна ємність адсорбенту визначають розміри апарата та ефективність очищення газів. Статична ємність свідчить про кіль-



кість речовин, що може адсорбувати адсорбент в умовах рівноваги, тобто коли концентрація адсорбтиву на вході та виході стає випадковою. Динамічна ємність адсорбенту відповідає поглинанню речовини шаром адсорбенту від початку адсорбції до початку “проскакування” адсорбтиву, тобто коли в газу-носії, що виходить з шару адсорбенту, з’являються сліди адсорбтиву. Адсорбтивна ємність виражається в грамах поглиненої речовини на 100 г адсорбенту або моль на грам, сантиметр кубічний на грам, процент за масою.

Адсорбент характеризується зовнішньою та внутрішньою поверхнею. Зовнішня поверхня залежить від кількості макропор й складає всього 0,5...2.0 м<sup>2</sup>/г, тобто 0.2...0,5% від загальної поверхні адсорбенту. Внутрішня поверхня утворюється за рахунок стінок середніх та мілких пор й може досягати 500...1000 м<sup>2</sup>/г. Поверхню пористого тіла визначають по величині адсорбції, що відповідає покриттю адсорбенту моношаром адсорбованих молекул

$$\xi = N_A a_m S_M \quad (5.3)$$

де  $N_A$  – число Авогадро;

$a_m$  – величина адсорбції, що відповідає покриттю поверхні суцільним моношаром адсорбованих молекул;

$S_M$  – площа, що її займає одна адсорбована молекула:

$$S_M = 1,53 V^{2/3}, \quad (5.4)$$

де  $V$  – мольний об’єм адсорбованої речовини.

Величину адсорбції можна визначити за ізотермою адсорбції або за рівнянням

$$\frac{P}{a'(P_s - P)} = \frac{1}{V_M C} + \frac{(C-1)P}{V_M C \cdot P_s}, \quad (5.5)$$

де  $a'$  – величина адсорбції;

$V_M$  – параметр, що характеризує кількість молекул пари, які необхідні щоб покрити поверхню адсорбенту суцільним моношаром (ємність моношару);

$C$  – константа, що визначається з рівняння

$$C = e^{(g_1 - g_2)/RT}, \quad (5.6)$$

де  $g_1$  – теплота адсорбції першого шару;

$g_2$  – прихована теплота конденсації.

Питома поверхня твердого тіла визначається за формулою, м<sup>2</sup>/г

$$S_n = (V_M/M) N_A S_M \cdot 10^{-20}, \quad (5.7)$$

де  $V_M$  – ємність моношару, в грамах адсорбату на грам твердого тіла;

$M$  – молекулярна маса адсорбату.

Пори адсорбентів утворюються за рахунок пустот між частинками. Об'єм, форма та розміри пор залежать від розмірів взаємного розміщення й щільності частинок, з яких побудований каркас пористого адсорбенту. Адсорбент з великими порами краще адсорбує речовини з великими розмірами молекул та при значних тисках. Середньопористий адсорбент при середніх тисках ефективніше адсорбує, а дрібнопористий – при низьких тисках. Основну роль при розділенні газових сумішей відіграють мікропори. Питомий опір мікропор адсорбентах досягає 0,2...0,6 см<sup>3</sup>/г, а питома поверхня – до 500 м<sup>2</sup>/г та більше. Об'єм та розміри пор визначають методом ртутної пірометрії.

$$\text{Сумарний об'єм пор, г/см}^3$$

$$V = 1/\rho_y = -1/\rho_d, \quad (5.8)$$

де  $\rho_d$  – дійсна щільність;

$\rho_y$  – уявна щільність.

Дійсна щільність адсорбенту

$$\rho_d = \frac{\rho_p a_n}{(g_2 - g_1) - (g_3 - g_4)}, \quad (5.9)$$

де  $\rho_p$  – щільність пікнометричної рідини, в якості якої використовують бензол ( $\rho_p = 0,879$  г/см<sup>3</sup>);

$a_n$  – вага досліджуваного твердого тіла, г;

$g_1, g_2, g_3, g_4$  – маса пікнометра, відповідно, пустого, з рідиною, з рідиною та адсорбентом, з адсорбентом.

Уявна щільність адсорбенту:

$$\rho_y = \frac{13,546 a_n}{(g'_1 - g'_2) + a_n}, \quad (5.10)$$

де  $g'_1$  – кількість пікнометричної рідини, в якості якої використовують ртуть;

$g'_2$  – маса пікнометра з ртуттю та з сорбентом.

Значення дійсної, уявної та насипної щільності деяких адсорбентів наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Щільність адсорбентів

Адсорбент	Щільність, кг/м <sup>3</sup>		
	дійсна	уявна	насипна
Активоване вугілля	1750...2100	500...1000	200...600
Дрібнопористий силікагель	2100...2300	1300...1400	800...850
Великопористий силікагель	2100...2300	750...800	500...600
Цеоліти	2100...2400	1200...1400	600...800

Вибірковість адсорбентів – це властивість адсорбувати, поглинати з газових сумішей індивідуальні речовини з певними фізико-хімічними властивостями. Вибірковість залежить від їх структурних властивостей, оскільки від розмірів пор залежить їх здатність адсорбувати молекули різної величини. Адсорбція може бути ефективна в тому випадку, коли середній радіус пор має той же порядок, що й адсорбовані молекули.

**Регенерація** – виділення з пор адсорбенту речовини, що поглинена ним. Ефективність процесу очищення газу визначається швидкістю та повнотою виділення з адсорбенту адсорбованої речовини. Методи десорбції: термічний; шляхом підвищення температури шару адсорбенту при звичайних (110...130<sup>0</sup>С) та підвищених (300...400<sup>0</sup>С) температурах; витісненням поглиненої речовини та десорбція комбінованими методами. Час десорбції розраховують за допомогою рівняння

$$\tau_d = 1/K_d \ln(a_n - a_p)(a' - a_p), \quad (5.11)$$

де  $a_n$ ,  $a_p$ ,  $a'$  – відповідно, початкова, рівноважна та поточна абсолютна величина адсорбції;

$K_d$  – коефіцієнт десорбції, г/(г.хв).

Для адсорбційного очищення газів від газо- й пароподібних забруднень використовують такі пористі адсорбенти: активоване вугілля, силікагелі, цеоліти, глинисті матеріали, пористе скло тощо.

Активоване вугілля – це пористі адсорбенти органічного походження, його отримують термічною обробкою без доступу повітря вугілля. В результаті цього вилучається волога та частково смоли. Пориста структура утворюється в результаті обробки вугілля паром, газами та хімічними реагентами. За розмірами й формою частинок активоване вугілля буває гранульоване та порошкоподібне. Гранульоване вугілля має форму циліндра діаметром 2...5 мм з дещо більшою висотою. Деколи його подрібнюють до фракцій 0,15...0,25 мм. Порошкоподібне вугілля містить частинки менше 0,15 мм. Їх недоліком є горючість.

Силікагелі – це мінеральний адсорбент, що дозволяє регулювати його пористу структуру, має підвищену механічну міцність та невисоку температуру регенерації (110...120<sup>0</sup>С). Силікагелі за своєю хімічною природою є гідратованим кремнеземом ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Силікагель виробляють в вигляді твердих скловидних зерен з насипною густиною 0,4...0,9 г/см<sup>3</sup> та розмірами зерен 1...7 мм. Недоліком силікагелей є руйнування зерен під дією вологи.

Цеоліти – це природні мінерали, що вибірково адсорбують однакові за розмірами молекули завдяки регулярній пористій структурі з однаковими за розмірами порами. Такими природними мінералами є сидерит, фожазит, еріонит, шабазит, модерніт, клиноптилоліт тощо. Шляхом термічної обробки ці речовини перетворюють в ефективні адсорбенти, що мають значну пористість, велику поверхню і однакові за розмірами пори. Адсор-

бційна ємність цеолітів становить 0,01...0,4 г/г. За допомогою цеолітів з газових сумішей добувають аміак, діоксид сірки, ацетилен, сірководень, діоксид вуглецю та інші забруднювачі.

#### **5.4 Технологічне обладнання для адсорбційного очищення газів від газо- й пароподібних забруднень**

Очищення газових викидів від газо- й пароподібних забруднень адсорбційним методом реалізується за допомогою технологічного обладнання, класифікація якого наведена на рис. 5.4.

Адсорбери періодичної дії з нерухомим шаром адсорбенту працюють за дво- або чотиристадійним режимом. Для забезпечення безперервності процесу очищення газових викидів установлюють декілька апаратів. Кожний з цих адсорберів періодично працює в режимі адсорбції або регенерації. При чотиристадійному режимі роботи в апараті послідовно виконуються такі операції: адсорбція, десорбція, сушення адсорбенту та охолодження адсорбенту. При двостадійному режимі сушення й охолодження адсорбенту суміщають з процесом адсорбції.

Недоліками, які знижують техніко-економічні показники роботи адсорберів з нерухомим шаром адсорбенту, є періодичність процесу, значний гідравлічний опір, необхідність декількох апаратів для забезпечення безперервності очищення газів, низьке використання ємності адсорбенту та корисного об'єму апарата, складність в управлінні й автоматизації процесом очищення газів.

Безперервність процесу і більш повне використання адсорбційної ємності адсорбенту забезпечують апарати з рухомим шаром адсорбенту. Це досягається за рахунок протиструминного й прямоструминного руху газу й адсорбенту. При цьому в одному апараті поєднуються всі стадії: адсорбція, регенерація, сушення й охолодження. Конструкція цих адсорберів дозволяє очищувати газові викиди від декількох забруднювачів. Недоліками адсорберів безперервної дії є швидка руйнація корпусу апарата та необхідність чіткого дотримання гідродинамічних характеристик процесу при їх експлуатації.

Інтенсифікація адсорбційних процесів може бути підвищена зміною гідродинамічного стану в апаратах. Це досягається створенням в адсорбері киплячого шару адсорбенту, де розміри частинок адсорбенту менші, ніж в нерухомому шарі. При цьому збільшується поверхня контакту фаз й зменшується внутрідифузійний опір твердої фази. Масообмін також інтенсифікується за рахунок більш високих швидкостей газових потоків. Стабільний киплячий шар адсорбенту утворюється, коли його висота рівна діаметру апарата. Недоліками апаратів з киплячим шаром є те, що киплячий шар створюється тільки при певних швидкостях газу, які в деяких випадках не є оптимальними для фізико-хімічного процесу адсорбції та не всі матеріали можна перевести в псевдорідинний стан.

Одним з прийомів підвищення стабільності киплячого шару в адсорбері є створення низькочастотних вібраційних коливань. Під дією вібраційних сил утворюється віброкиплячий шар адсорбенту, що забезпечує хороше перемішування твердої та газоподібної фаз. В результаті зменшується зовнішньодифузійне гальмування, що підвищує швидкість тепло- й масопередачі. Віброкиплячий шар може бути створений шляхом дії на сипучий матеріал віброуючих поверхонь. Структура шару, умови перемішування на віброуючій поверхні залежать від частоти, амплітуди й траєкторії коливальних рухів поверхні. Для створення віброкиплячого шару використовують гармонічні коливання. Умовно киплячий шар може бути створений в умовно-нерухомомому середовищі та при однаковій фільтрації газу.

Для інтенсифікації адсорбційних процесів з очищення газів від газо- й пароподібних забруднень використовують оптимальні гідродинамічні режими очищення адсорбентів, нові типи адсорбентів та адсорбційних апаратів. Оптимальними гідродинамічними умовами є такі, що забезпечують значні швидкості фільтрації очищуваного газу через адсорбент та великий ступінь очищення газу при малому гідравлічному опорі шару. Підвищення швидкості руху приводить до інтенсифікації процесу масопередачі, але при цьому суттєво збільшується гідравлічний опір та енергетичні затрати на транспортування газів.

Перспективним напрямком інтенсифікації адсорбційних процесів є використання кристалів цеолітів в вигляді тонких порошоків без в'язучого. В якості поглинача при цьому використовуються суспензії, які складаються із рідини-носія та цеоліту. Як рідина-носії можуть бути органічні та неорганічні розчини.



**Рисунок 5.4 - Класифікація технологічного обладнання для адсорбційного очищення газів**

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

1. Охарактеризуйте адсорбційний метод очищення газових викидів.
2. В чому різниця між фізичною й хімічною адсорбцією?
3. Поясніть суть рівноваги при адсорбційному процесі.
4. Наведіть типи ізотерм процесу адсорбції.
5. Поясніть чим обумовлюється швидкість процесу адсорбції.
6. Наведіть види адсорбентів та вимоги до них.
7. Дайте характеристику адсорбентів.
8. Поясніть суть десорбції.
9. Наведіть класифікацію технологічного обладнання для адсорбційного очищення газових викидів.
10. Розкрийте особливості адсорберів з нерухомим шаром адсорбенту.
11. Поясніть принцип роботи адсорберів з рухомим шаром адсорбенту.
12. За рахунок чого інтенсифікується процес адсорбції в апаратах з киплячим та віброкиплячим шаром.

## 6 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ КАТАЛІТИЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ

### 6.1 Суть каталітичного методу очищення газових викидів

Перспективним методом очищення газів є каталітичні процеси, що ґрунтуються на нейтралізації шкідливих домішок шляхом дії на них спеціальними речовинами – каталізаторами.

Каталізатори – речовини, що беруть активну участь в хімічній реакції, але залишаються незмінними після її закінчення.

Каталітичні процеси очищення газів є високопродуктивними, стабільно забезпечують високий ступінь очищення та здійснюються за допомогою компактного обладнання.

Каталітичні процеси бувають гомогенні та гетерогенні, що визначається агрегатним станом речовини, яка бере участь в каталізі.

Технологія очищення та необхідне обладнання визначаються видом каталізу. При гомогенному каталізі каталізатор та реагуючі речовини знаходяться в одній фазі, наприклад, газовій. При гетерогенному процесі каталізатор та реагуючі речовини знаходяться в різних фазах.

Основним фактором, що визначає швидкість каталітичної реакції, є енергія активації. Чим більша енергія активації, тим менше частинок мають в системі таку енергію і тим повільніше відбувається реакція. Якщо величина енергії активації значно менша енергії, яка необхідна для розривання старих зв'язків, то вона частково компенсується енергією, що звільняється при створенні нових зв'язків. Ступінь компенсації описується рівнянням

$$\alpha_k = (\sum E_z - E) / \sum E_z, \quad (6.1)$$

де  $\sum E_z$  - сума енергій зв'язків, що розриваються;

$E$  - енергія активації.

Ступінь компенсації ( $\alpha_k = 92\dots 96\%$ ) характерний для реакцій за участю радикалів. Енергія активації для таких реакцій становить 40... 50 кДж/моль. В реакціях з молекулами ступінь компенсації зменшується до 60... 70%, а енергія активації збільшується до 150... 250 кДж/моль. Тобто, проведення корисних хімічних реакцій досягається шляхом використання каталізаторів, які збільшують ступінь компенсації та знижують енергію активації. Це сприяє збільшенню швидкості хімічних реакцій.

При очищенні газів від домішок використовують тверді каталізатори. Каталіз на твердих каталізаторах складається з таких стадій:

- зовнішня дифузія реагуючих речовин до поверхні каталізатора;
- внутрішня дифузія в порах зерен каталізатора;
- активована (хімічна) адсорбція одного або декількох компонентів на поверхні каталізатора;



- перегрупування атомів (хімічна реакція);
- зворотна дифузія продукту в порах зерен каталізатора;
- дифузія продуктів від поверхні зерна.

Кожна з цих стадій каталітичного процесу повинна мати енергію активації, що значно менша, ніж енергія активації реакції при відсутності каталізатора. В іншому випадку каталітичний процес енергетично буде неможливий.

Загальна швидкість каталітичного процесу визначається відносними швидкостями окремих стадій та може лімітуватися найменшою з них. Розрізняють процеси, що протікають в кінетичній, зовнішньодифузійній та внутрішньодифузійній областях.

В кінетичній області сумарна швидкість каталітичного процесу визначається швидкістю хімічної реакції й не залежить від процесів переносу, а залежить тільки від природи реагуючих речовин та каталізатора. Рівняння швидкості реакції має вигляд

$$u = K \Delta P P^n \beta, \quad (6.2)$$

де **K** - константа швидкості реакції;

**$\Delta P$**  - рухома сила процесу;

**P** - безрозмірний тиск, що показує відношення робочого тиску до атмосферного;

**$\beta$**  - коефіцієнт перерахунку до нормального тиску й температури;

**n** - параметр, що характеризує порядок реакції.

В кінетичній області реакції відбуваються з використанням малоактивних каталізаторів та при температурах, що наближаються до температури запалювання каталізатора. Швидкість таких процесів неможливо збільшити поліпшенням структурних властивостей каталізаторів за рахунок підвищення кількості макро- й мікропор або збільшенням турбулентності потоків. Її можна збільшити, тільки змінюючи природу каталізатора та підвищуючи температуру процесу.

В зовнішньодифузійній області сумарна швидкість каталітичного процесу визначається швидкістю підведення (дифузії) реагуючих речовин в зону реакції. Цю швидкість можна збільшити шляхом збільшення макропор каталізатора та перемішуванням реагентів. Збільшення поверхні мікропор в цьому випадку недоцільно, поскільки вони майже не беруть участі в процесі каталізу. Границею збільшення турбулентності потоків є перехід системи із зовнішньодифузійної області у внутрішньодифузійну або в кінетичну області.

Швидкість дифузії визначають на основі першого закону Фіка

$$U_d = dG / d\tau = - D_e a_k dc / dt, \quad (6.3)$$

де  **$D_e$**  - сумарний коефіцієнт ефективної дифузії в газовому середовищі, що розраховується з врахуванням молекулярної та турбулентної дифузії;

**$a_k$**  - зовнішня поверхня зерен каталізатора;

**$dc / dt$**  - градієнт концентрації;

$G$  - кількість речовини, що переноситься за час  $\tau$  в напрямку перпендикулярному до поверхні зерна каталізатора.

У внутрішньодифузійній області сумарна швидкість каталітичного процесу визначається швидкістю підведення реагуючих речовин в зону реакції в мікропорах зерна каталізатора. Збільшити швидкість можна шляхом зменшення розмірів зерна каталізатора або збільшенням внутрішньої поверхні каталізатора, що створюється тонкими порами малої довжини.

Час дифузії компонента в пори каталізатора на глибину  $l$  визначається за формулою Ейнштейна

$$\tau = l^2 / 2 D_e , \quad (6.4)$$

де  $l$  - глибина пори каталізатора.

При довжині вільного пробігу молекули компонента ( $\lambda$ ) менше діаметра пори ( $r$ ), тобто коли  $\lambda < 2r$ , сумарний коефіцієнт ефективної дифузії в газовому середовищі дорівнює коефіцієнту дифузії в газовій фазі ( $D_r$ ) і визначається з рівняння

$$D_e = D_r = \frac{0,00837 T^{5/2} \sqrt{1/M_A + 1/M_B}}{P(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2 (T + C_{A+B})} , \quad (6.5)$$

де  $M_A, M_B$  - мольні маси речовин А та В, г/моль;

$V_A, V_B$  - мольні об'єми речовин А та В, см<sup>3</sup>/моль;

$P$  - загальний тиск (0,1 МПа);

$C_{A+B}$  - константа Сезерденда, що обчислюється за формулою

$$C_{A+B} = 1,47 \varphi (T_A' T_B')^{0,5} , \quad (6.6)$$

де  $T'$  – температура кипіння компонентів А й В;

$\varphi$  - коефіцієнт, що враховує співвідношення між мольними об'ємами речовин

$$\varphi = 8 \frac{(V_A V_B)^{0,5}}{V_A + V_B} . \quad (6.7)$$

Якщо  $V_A = V_B$ , то коефіцієнт  $\varphi=1$ .

За умови, що  $\lambda > 2r$ , коефіцієнт ефективної дифузії обчислюють за формулою

$$D_e = 2/3 r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} . \quad (6.8)$$

Якщо довжина вільного пробігу молекули компонента дорівнює радіусу пори, то

$$D_e = D_r (1 - e^{-2r/\lambda}) . \quad (6.9)$$

Суттєво впливає на процес каталізу температура. Вона не тільки змінює швидкість каталізу, але й лімітує стадію процесу. При відносно низьких температурах, коли швидкість реакції мала в порівнянні зі швидкістю дифузії, концентрація реагуючих речовин та продуктів реакції по глибині зерен

каталізатора зменшується несуттєво та близька до концентрації їх в газовому потоці. В цьому випадку процес каталізу протікає в кінетичній області. Ступінь використання внутрішньої поверхні наближається до одиниці і процеси перенесення не впливають на швидкість хімічних перетворень.

З підвищенням температури швидкість хімічної реакції збільшується. Одночасно збільшується також швидкість дифузії. Але константа швидкості реакції збільшується з підвищенням температури швидше, ніж коефіцієнт дифузії. В цих умовах підведення реагуючих речовин шляхом дифузії не забезпечує постійну концентрацію суміші, що бере участь в реакції, по всій глибині пор каталізатора. При певних температурах настає момент, коли компонент вступає в хімічну реакцію ще до того, як він проникає на всю глибину в пори каталізатора. Відповідно, певна частина внутрішньої поверхні пор каталізатора через дефіцит вихідних речовин фактично не бере участі в каталізі і процес переходить в область внутрішньої дифузії. Ступінь використання внутрішньої поверхні каталізатора буде менша одиниці. Швидкість каталізу в цьому випадку буде лімітуватися процесом перенесення речовини в мікропорах каталізатора. При подальшому збільшенні температури швидкість хімічної реакції ще більше збільшується. Речовини, що надходять в зону реакції, не проникають глибоко в пори каталізатора. Область внутрішньої частини пор, що не бере участі в каталізі, збільшується.

## 6.2 Характеристика каталізаторів

В якості каталізаторів використовують речовини, що не входять в кінцеві продукти хімічної реакції, але міняють її швидкість. Каталізатори повинні мати такі властивості: високу активність й селективність по відношенню до даної реакції; високу хімічну стійкість по відношенню до каталізаторної отрути; низьку температуру запалювання; термічну стійкість; підвищену теплопровідність; значний температурний інтервал роботи; високу механічну міцність; бути дешевими у використанні. В якості каталізаторів використовують платину, паладій та інші чисті метали або їх з'єднання, оскільки активність біметалевих каталізаторів вища.

Активатори (промотори) – це речовини, що підвищують активність каталізаторів. Активатори можуть не мати каталітичних властивостей, але вони здатні підсилювати дію каталітично активних речовин. Вони вступають в реакцію з каталізатором й утворюють з'єднання, що мають більшу в порівнянні з чистими каталітичними речовинами активність. Активатори можуть збільшувати активність каталітичних речовин в сотні й тисячі разів.

Носіями є речовини, що самі не мають каталітичних властивостей та не підсилюють активність каталізатора, а є основою, на яку наноситься каталізатор. В деяких випадках носії можуть впливати на активність та селективність каталізаторів. Використання носіїв дозволяє змінювати структу-

ру каталізаторів та зменшувати витрати каталітично активних речовин. В якості носіїв використовують інертні пористі речовини, що мають розвинуту поверхню. Такими речовинами є активне вугілля, алюмосилікати, силікагелі, азбест, пемза, цеоліти тощо.

Каталітична активність каталізатора – це міра прискорення реакції під дією каталізатора

$$A = V_k / V, \quad (6.10)$$

де  $V_k$ ,  $V$  – відповідно, швидкості каталітичної реакції та тієї ж реакції, що проведена при відсутності каталізатора.

Якщо реакція при відсутності каталізатора не відбувається, то активність каталізатора може бути виражена кількістю продукту в кілограмах, що її отримано в результаті каталітичної реакції, і віднесеною до об'єму, маси або поверхні каталізатора.

Селективність каталізатора показує відношення вмісту цільового продукту в кількості всіх продуктів перетворення вихідної речовини. Для комплексного очищення газів, в яких є декілька шкідливих компонентів, використовують універсальні каталізатори, що мають активність не в одній реакції. Так, комплексного очищення потребують гази, що містять суміш декількох вуглеводів, та гази, до складу яких входять оксиди азоту, діоксид сірки та вуглеводні.

Значну селективність мають мембранні каталізатори. Їх отримують шляхом нанесення каталітично активних речовин на поверхню мембрани, яка сама не має каталітичної активності, але вибірково селективна до однієї або декількох речовин, що беруть участь в реакції.

В промислових умовах активність каталізаторів поступово зменшується. Тому їх періодично регенерують або замінюють. Втрата активності каталізаторів відбувається за рахунок фізичних й хімічних факторів. До фізичних факторів відносяться механічне стирання, перегрівання, спікання тощо. Хімічним фактором є поступове насичення поверхні каталізатора різними домішками, що містяться в газах або утворюються при каталізі за рахунок побічних реакцій.

Важливою характеристикою каталізаторів є стійкість до дії різних домішок, тобто до каталітичної отрути. Отруєння – це часткова або повна втрата активності каталізатора під дією домішок, що називаються контактною отрутою. Отруєння каталізатора відбувається внаслідок сорбції каталітичної отрути на поверхні каталізаторів та блокування їх активних центрів. Для багатьох каталізаторів отрутою є сірка, сірководень, оксид вуглецю, вода, оксид азоту, фосфор, свинець, ртуть та інші. Якщо отруту видалити з поверхні каталізатора, то він може повністю або частково відновити свою активність. При тимчасовому отруєнні каталізатора після видалення отрути він повністю відновлює свою активність. При постійній втраті активності після видалення отрути каталізатор не поновлює свої властивості. В цьому випадку регенерацію можна виконати прокалюван-

ням та обробкою кислотами або лугами.

Температура запалювання – мінімальна температура, при якій катализатор починає проявляти свої властивості. З метою зниження енергії на нагрівання доцільно використовувати катализатори з мінімальною температурою запалювання. Це дозволяє знизити затрати енергії на нагрівання сировини, скоротити теплові втрати, запобігти перегріванню катализатора, продуктів каталізу та обладнання.

Термічна стійкість – це максимальна температура, при якій катализатор зберігає свою активність та механічну стійкість. Температура в зоні каталізу досягає декількох сотень градусів. Доцільно, щоб катализатор мав високу термічну стійкість та підвищену теплопровідність, що запобігає від місцевого перегрівання катализатора та зниження його активності.

Температурний інтервал роботи катализатора – це різниця між термічною стійкістю та температурою запалювання катализатора. Доцільно використовувати катализатори з великим температурним інтервалом роботи, оскільки в процесі каталізу часто виділяється тепло і температура в зоні реакції самочинно збільшується.

Довговічність катализатора визначається його механічними властивостями. Норма стирання катализаторів в киплячому шарі складає 1...3% на місяць.

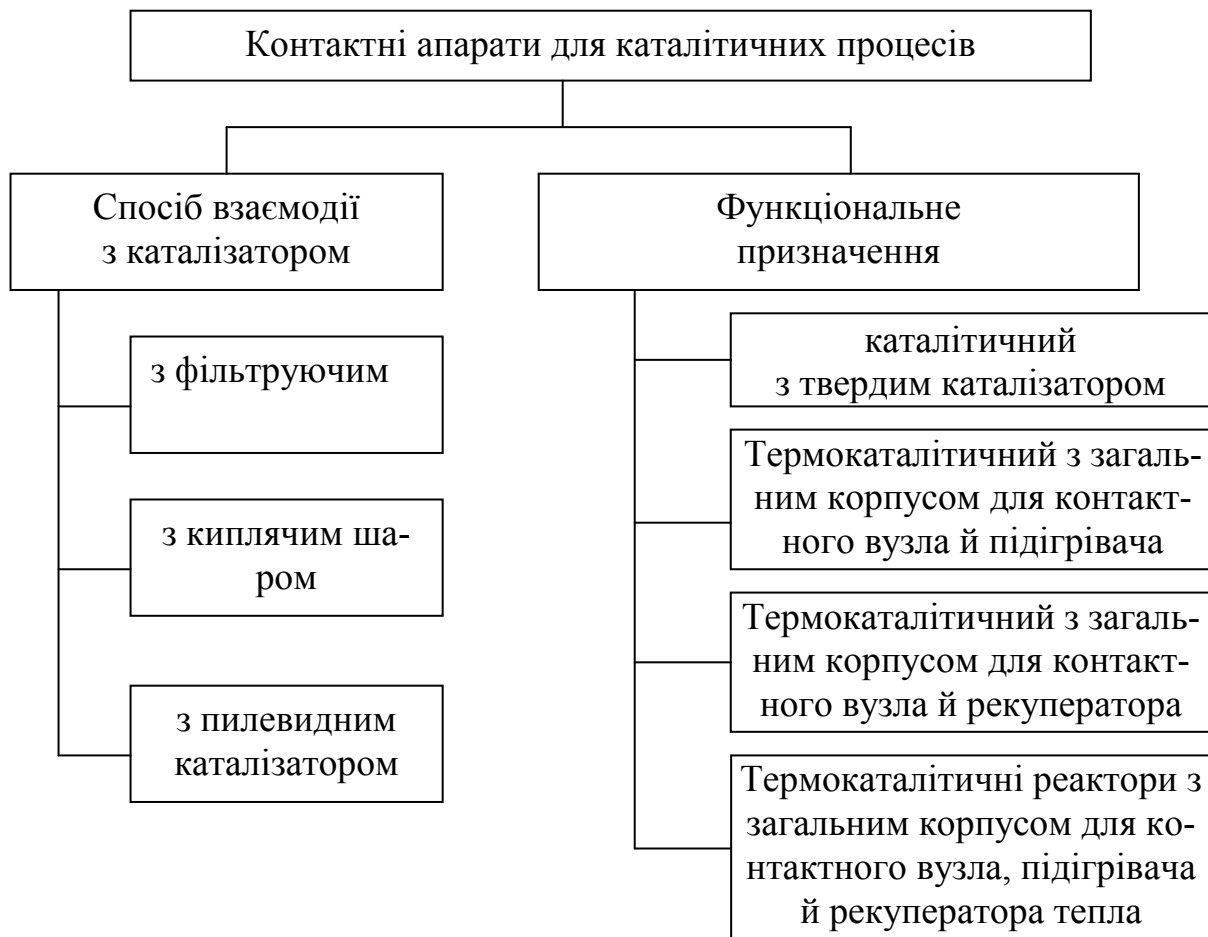
З метою зниження вартості катализаторів доцільно використовувати сполуки речовин з незначним вмістом дорогих металів (платина, срібло, паладій, рутеній).

Технологія отримання катализаторів визначається їх видом та формою: металеві сітки, гофровані стрічки, керамічні блоки, кільця, кульки тощо. Поширені контактні маси у вигляді таблеток, які отримують шляхом сумісного осадження каталітично активних речовин з наступним додаванням активаторів та наповнювачів. Виробництво таких катализаторів включає такі стадії: підготовку сировини, розчинення, сушку, прокалювання та формування таблеток.

### **6.3 Технологічне обладнання для каталітичного очищення газів**

Для каталітичного очищення газових викидів використовують різне за способом взаємодії з катализатором та функціональним призначенням обладнання, класифікація якого наведена на рис. 6.1.

Апарати з фільтрувальним шаром катализатора бувають ємнісні, трубчасті і з полицями. Принцип їх дії ґрунтується на фільтрації газу через шар нерухомого катализатора. Катализатор може бути у вигляді металевих сіток, що натягнуті за рухом газу, трубчатих контактних апаратів та у ви-



**Рисунок 6.1 – Класифікація технологічного обладнання для каталітичного очищення газів**

гляді твердих тіл різної форми, що розміщені на перфорованих решітках. Гази надходять в апарат знизу або зверху. При подаванні газу знизу його швидкість не повинна перевищувати швидкість псевдоруху каталізатора. Перевагою цих апаратів є простота конструкції. Їх недоліком є відсутність теплообміну, що не дозволяє відбуватися реакціям, які мають значний тепловий ефект. Для повноти протікання каталітичного процесу в одному апараті розміщують декілька шарів контактної маси. Багат шарові поличні контактні апарати дозволяють очищений газ додатково обробляти (підігрівати, охолоджувати, зволожувати тощо).

В апаратах з фільтрувальним шаром в місцях дотику гранул каталізатора утворюються зони, що погано омиваються газом. Для усунення цього недоліку використовують апарати з підвішеним (киплячим) шаром. В киплячому шарі кожна гранула каталізатора інтенсивно з усіх боків омивається газом, який очищається каталітичним способом. Перевагою цих апаратів є те, що інтенсивне перемішування частинок обумовлює хорошу теплопровідність шару і високі коефіцієнти тепловіддачі від шару до поверхні теплообмінників. Рухомий шар каталізатора дозволяє механізу-

вати й автоматизувати процес безперервного завантаження й вивантаження каталізатора, підтримувати постійний шар каталізатора, інтенсивне перемішування твердої фази виключає можливість перегріву або охолодження каталізатора. Є можливість використовувати каталізатор з гранулами малих розмірів, що збільшує питому поверхню та знижує дифузійне гальмування каталітичного процесу. Недоліком апаратів з киплячим шаром є стирання й винесення пиловидного каталізатора з апарата, неможливість організації протистримення та підвищена ерозія обладнання, яке розміщене в зоні киплячого шару.

Сучасне технологічне обладнання для каталітичного очищення газів повинно бути високопродуктивним, забезпечувати безперервність каталітичного процесу при оптимальних робочих режимах, бути легким в управлінні та піддаватись автоматизації. З метою вдосконалення й інтенсифікації каталітичних процесів необхідно впроваджувати нові ефективні каталізатори з високою активністю, вибірковістю, універсальністю по відношенню до забруднювачів, доступні в виготовленні, з великою продуктивністю, стійкі до отрути, з низькою температурою запалювання, підвищеною механічною міцністю, з малим гідравлічним опором, з незначним вмістом дорогих металів та дешеві. Перспективними є сотові каталізатори на керамічній основі та мікросферичні каталізатори для обробки середовищ, що знаходяться в підвішеному стані.

Конструкції реакторів повинні забезпечувати велику продуктивність, незначний гідравлічний опір, доступність для завантаження й вивантаження каталізатора, мати невелику металоємкість, бути доступним для монтажу, ремонту й транспортування.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

1. Охарактеризуйте суть каталітичного методу очищення газових викидів.
2. Які фактори визначають швидкість каталітичної реакції?
3. Наведіть стадії каталізу на твердих каталізаторах.
4. Поясніть суть каталізу в кінетичній області реакції.
5. Розкрийте суть каталітичного процесу в зовнішньодифузійній області.
6. Охарактеризуйте, як температура впливає на процес каталізу.
7. Дайте характеристику каталізаторів.
8. Які фактори обумовлюють вибір каталізаторів?
9. Наведіть класифікацію технологічного обладнання для каталітичного очищення газів.
10. Охарактеризуйте апарати з фільтрувальним шаром каталізатора.
11. Поясніть особливості апаратів з киплячим шаром.
12. Які шляхи вдосконалення й інтенсифікації каталітичних процесів?

## 7 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕРМІЧНОГО ЗНЕСКОДЖЕННЯ ПАРОГАЗОВИХ ВИКИДІВ

### 7.1 Суть термічного знешкодження парогазових викидів

Термічне знешкодження парогазових викидів ґрунтується на високо-температурному спалюванні горючих домішок, тобто окисленні знешкоджуваних компонентів. Цей метод має широке розповсюдження тому, що відсутнє шлакове господарство й стічні води, невеликі розміри установок, простота обслуговування, можливості автоматизації, висока ефективність знешкодження при низьких затратах коштів.

При виборі термічного методу необхідно враховувати характер речовин, що утворюються під час реакції окислення. При спалюванні газів, що містять фосфор, галогени та сірку, утворюються продукти реакції, які за токсичністю в декілька разів перевищують вихідні газові викиди. Цей метод використовують для знешкодження викидів, які під дією високих температур не утворюють більше токсичних речовин. Необхідно також враховувати, що сполуки горючих речовин з киснем утворюють вибухонебезпечну суміш, що характеризується верхньою та нижньою границею вибуху, яка залежить від температури, тиску, концентрації інертних газів. Концентрація горючих речовин в суміші не повинна перевищувати 25% нижньої границі вибуху. Для запобігання утворення вибухонебезпечних сумішей концентрацію газових викидів зменшують добавками повітря. При термічному знешкодженні парогазових викидів необхідно враховувати наявність в них речовин, що конденсуються (смола, гарячий пил). При транспортуванні таких газів може відбуватися самозапалення, що є причиною аварійних ситуацій.

Суттєве значення в організації процесу термічного знешкодження газових викидів має підготовка газів до реакції, а саме нагрівання суміші до необхідної температури і забезпечення змішування горючих газів з окислювачем. Ефективність процесу термічного знешкодження сумішей визначається температурою, часом перебування газу в зоні реакції та турбулентністю газових потоків в камері згорання. Час протікання процесу визначається за формулою

$$\tau = \sqrt{\frac{\ln \frac{1}{1-\phi}}{A(T_k - T_3)}} \quad , \quad (7.1)$$

де  $\phi$  – ступінь знешкодження газів;

$A$  – аеродинамічний коефіцієнт, що характеризує аеродинамічні умови протікання процесу;

$T_k$  – температура в камері реакції;



$T_3$  – температура загорання компонента, який знешкоджується.

При збільшенні часу протікання процесу й інтенсивності турбулентної дифузії ступінь знешкодження, якщо температура не міняється, суттєво збільшується. Якщо час протікання та аеродинамічні умови процесу незмінні, то збільшення ступеня знешкодження можна досягнути за рахунок підвищення температури.

В залежності від умов спалювання та технологічного оформлення процесу використовують два методи знешкодження парогазових викидів: факельний та топковий.

## 7.2 Технологічне обладнання для термічного знешкодження парогазових викидів в топкових пристроях

Технологічне обладнання для термічного знешкодження парогазових викидів в топкових пристроях повинно відповідати таким вимогам: повнота спалювання; попередження утворення інших шкідливих речовин; бездимність спалювання; стабільність технологічного процесу горіння при зміні витрати та складу газів, що викидаються; низька вибухонебезпечність; відповідність шуму санітарним вимогам.

Термічне знешкодження парогазових викидів реалізується в різних за конструктивними особливостями топкових пристроях, класифікація яких наведена на рис. 7.1.

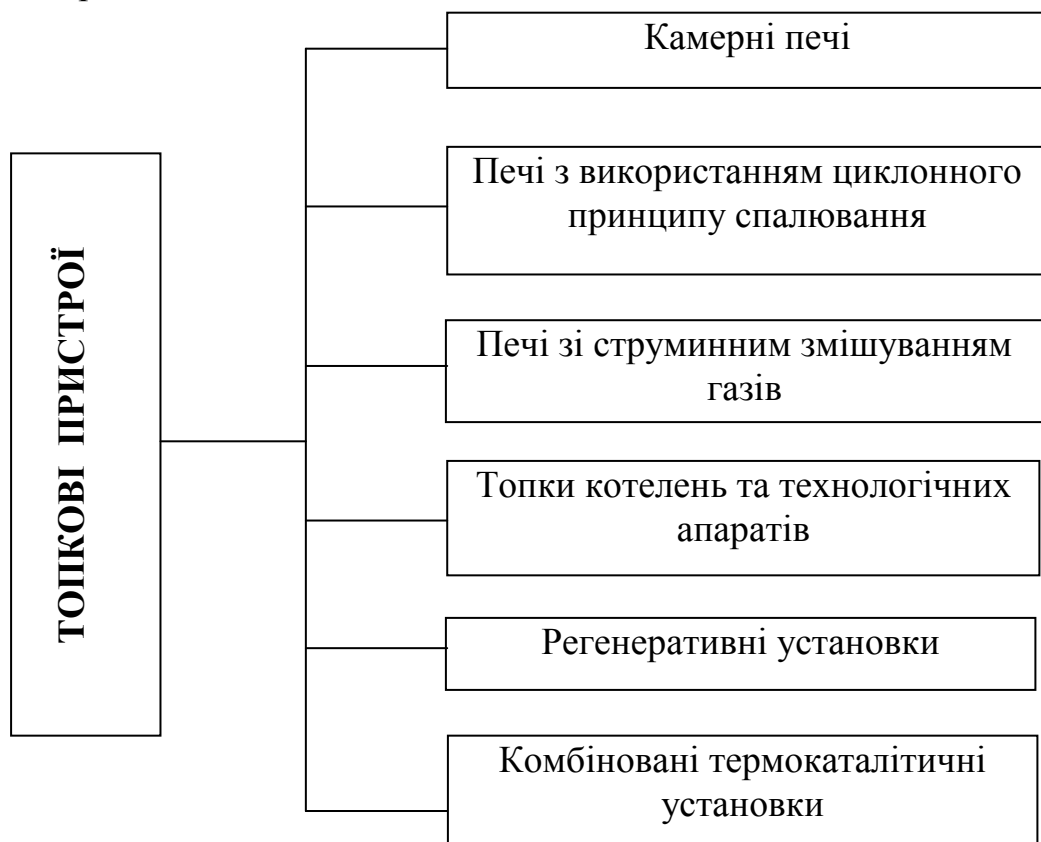


Рисунок 7.1 - Класифікація технологічного обладнання для термічного знешкодження парогазових викидів в топкових пристроях

Конструктивно камерні печі мають дві камери: камеру спалювання та камеру змішування, що переходить в газохід. Із газоходу знешкодженні газу надходять в атмосферу через димову трубу. Знешкодження газів відбувається при температурі 850...930°C, а час перебування продуктів в зоні горіння становить 0,5...3,5 с.

Печі з використанням циклонного принципу спалювання газоподібних викидів мають тангенціально розміщені пальники. Температура спалювання 800...1000°C. Ці печі мають в залежності від хімічного складу продуктів, які спалюються, різні конструктивні особливості. Ефективність очищення складає не менше 98%.

Основним елементом печей зі струминним змішуванням газів є стабілізатор. Він виконаний у вигляді тіла з погано обтічними формами, що дозволяють генерувати поля високої турбулентності. Використання струминного способу сумішоутворення дозволяє отримати значну інтенсивність процесу термічного знешкодження парогазових викидів.

Для термічного знешкодження викидів, що містять кисень, доцільно використовувати топки котелень та технологічних апаратів. В цьому випадку шкідливі викиди використовуються як окислювачі і подаються безпосередньо до пальників котла або в зону горіння. В топках деяких котлів теплота спалювання газових викидів досягає 200...250 кДж/м<sup>3</sup>. Ефективність знешкодження шкідливих викидів складає 99...100%. Додаткова кількість тепла, що отримується при термічному знешкодженні в топках котелень та технологічного обладнання, дозволяє економити 3...4% палива.

Економічними та перспективними для термічного знешкодження парогазових викидів є печі з використанням регенеративних теплообмінних установок. Регенеративні установки конструктивно виконуються у вигляді печей, що мають камери горіння та два або декілька шарів регенеративної насадки. За рахунок реверсивного руху через апарат газів, що знешкоджуються, шари насадки забезпечують утилізацію тепла за допомогою насадки, яка нагрівається продуктами горіння і віддає акумульоване тепло знешкодженному газу. Ступінь регенерації тепла в установці досягає 85%, а ступінь очищення газу 99%. Регенеративні установки дозволяють знизити затрати палива на процес термічного знешкодження парогазоподібних викидів.

При термічному знешкодженні високомолекулярних речовин, в тому числі канцерогенних, неможливо досягнути їх повного окислення навіть при 1300°C. Для знешкодження таких речовин використовують комбіновані термокаталітичні установки, що мають два ступеня. В першому ступені відбувається термічне знешкодження домішок, а в другому – глибоке окислення каталітичним способом.

### 7.3 Технологічне обладнання для знешкодження парогазових викидів в факельних пристроях

Знешкодження парогазових викидів в факельних пристроях використовують коли їх неможливо знешкодити в топкових пристроях. В факельних пристроях спалюють нафтові супутні гази, ацетилен, пропан, метан, пропилен та інші вуглеводні. В залежності від характеру спалювання технологічне обладнання для знешкодження парогазових викидів поділяється на три типи: факели, в яких спалюваний газ й повітря попередньо змішуються за межами зони горіння; факели, в яких кисень з'єднується з горючим газом в момент горіння; комбіновані факели, в яких частина кисню попередньо змішується з горючим газом, а решта кисню надходить з повітря навколишнього середовища.

Термічне знешкодження парогазових викидів реалізується в різних за конструктивними і технологічними особливостями факельних установках, класифікація яких наведена на рис. 7.2.



Рисунок 7.2 – Класифікація технологічного обладнання для термічного знешкодження парогазових викидів в факельних установках

Основною частиною факельної установки є факельна труба, що обладнана пальниками постійної дії, факельним пальником та пристроєм для запалювання. На факельній трубі також в разі необхідності передбачають пристрій для бездимного спалювання викидних газів, вогнезагороджувач, гідрозатвор та сепаратор.

Діаметри факельної труби та пальника вибирають з умови забезпечення стабільного горіння газу без зриву полум'я у випадку зміни навантаження. Швидкість газів в гирлі факельної труби приймається з врахуванням складу газів, що подаються на факел. Висота факельної труби 10...20 м.

Для забезпечення повноти спалювання і отримання бездимного полум'я передбачають подачу в зону спалювання пари або розпиленої води за допомогою форсунок, що розміщені на периферії факельного пальника. При спалюванні різних газів передбачають декілька факельних труб, що монтуються в одну конструкцію. Конструкції пальників можуть бути різними в залежності від особливостей термічного знешкодження викидних парогазових викидів.

#### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

1. Охарактеризуйте суть термічного знешкодження парогазових викидів.
2. Які фактори визначають ефективність процесу термічного знешкодження?
3. Чим визначається час протікання процесу термічного знешкодження?
4. Наведіть класифікацію технологічного обладнання для термічного знешкодження парогазових викидів в топкових пристроях.
5. Поясніть конструктивні особливості топкових пристроїв.
6. Наведіть класифікацію технологічного обладнання для термічного знешкодження парогазових викидів в факельних установках.
7. Охарактеризуйте основні частини факельних установок.

## 8 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОГО Й МАГНІТНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ

### 8.1 Суть електричного методу очищення газових викидів

Одним з досконалих методів очищення газів від завислих частинок пилу й туману є електричне очищення. Воно ґрунтується на використанні в електричних фільтрах дії на завислі частинки електричних сил.

Основними елементами електричного фільтра є коронувальний 1 та осаджувальний 2 електроди, які утворюють неоднорідне електричне поле 3 (рис. 8.1).

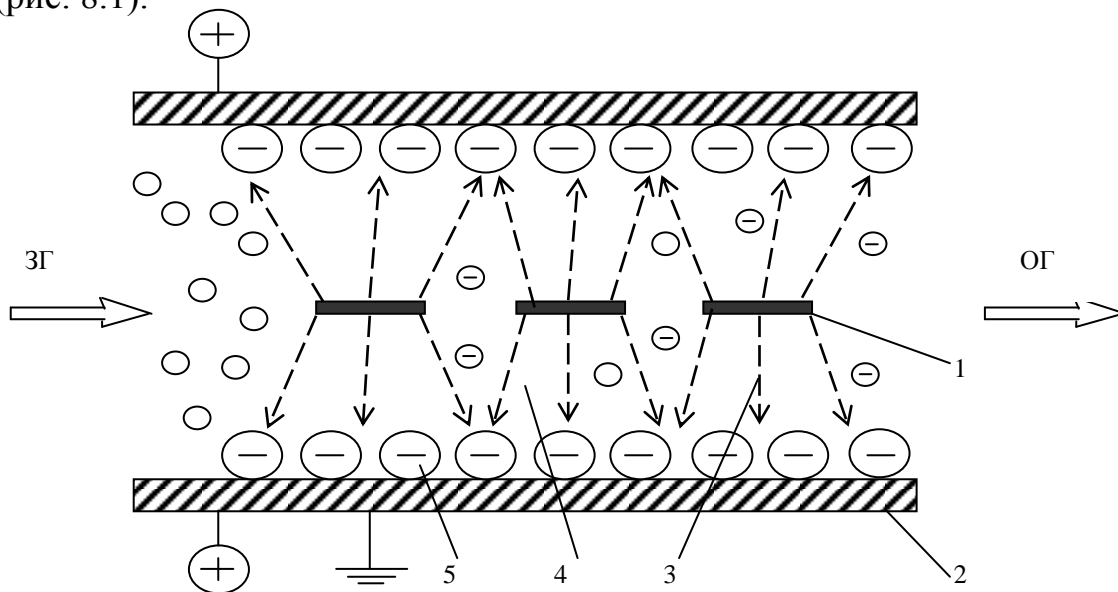


Рисунок 8.1 – Принцип роботи електрофільтра:

1 - коронувальний електрод; 2 – осаджувальний електрод;  
3 – електричне поле; 4 – заряджена зона; 5 – осівний шар пилу

Коронувальні електроди 1 ізольовані від землі, а осаджувальні електроди 2 заземлені. До коронувальних електродів підводиться випрямлений струм негативної полярності напругою 50...80 кВ, а осаджувальні електроди підключені до позитивного полюсу. Коронувальні електроди виконуються у вигляді тонкого дроту, а осаджувальні електроди виготовляють у вигляді циліндричних або шестигранних труб та профільованих пластин.

Очищення газів в електричних фільтрах відбувається таким чином. Забруднені гази пропускають через неоднорідне електричне поле 3, що утворюється між коронувальним 1 та осаджувальним 2 електродом. Внаслідок дії електричного поля вільні електрони і позитивно заряджені молекули починають переміщуватися в напрямку силових ліній поля. Напрямок руху кожного заряду залежить від його знаку, а швидкість руху – від напруженості електричного поля. Чим вища напруженість електричного поля між коронувальним і осаджувальним електродом, тим більше прис-

корення отримують іони та електрони. При достатньо високій швидкості іони та електрони, коли стикаються з нейтральними газовими молекулами, іонізують їх, тобто вибивають з них частину зовнішніх електронів. Електрони, що створюються внаслідок іонізації, також іонізують молекули газу, тобто відбувається процес ударної іонізації. Найбільш інтенсивно ударна іонізація відбувається біля поверхні коронувального електрода, до якого підведена напруга. При віддаленні на відстань  $X$  від коронувального електрода напруженість електричного поля зменшується до величини, яку можна визначити за формулою, В/м:

$$E_x = U / 2,3 \lg (R_2/R_1) , \quad (8.1)$$

де  $U$  – напруга, що прикладена до коронувальних електродів, В;

$R_1$  та  $R_2$  - радіуси коронувального і осаджувального електродів, м.

Розряд зі змінною напруженістю називається коронним, а напруга, при якій виникає коронний розряд, - критичною. Зміну сили струму і напруги при коронному розряді наведено на рис. 8.2.

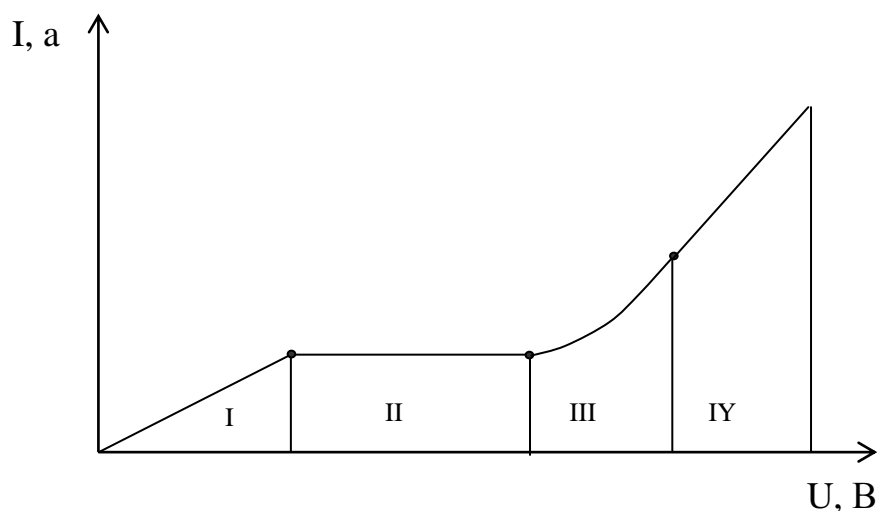


Рисунок 8.2 – Зміна сили струму із збільшенням напруги в електрофільтрі

Відповідно до рис. 8.2 зміні сили струму із збільшенням напруги в електрофільтрі відповідає чотири періоди: I- початкова іонізація; II - насичення; III - коронування; IV - дуговий електричний розряд.

Зовнішнім виявом коронного розряду є помітне в темноті слабе світіння навколо коронувального електрода блакитно-фіолетового кольору. Критичну напруженість електричного поля, при якій виникає корона, для повітря обчислюють за формулою, В/м:

$$E_0 = 3,04 / \beta + 0,0311 \sqrt{\beta / R_1} \cdot 10^{-6} , \quad (8.2)$$

де  $R_1$  – радіус коронувального електрода, м;

$\beta$  – відношення густини повітря в робочих та стандартних умовах:

$$\beta = (P_{\text{бар}} \pm P) \cdot 293 / 101,3 \cdot 10^3 (273 + t), \quad (8.3)$$

$P_{\text{бар}}$  – барометричний тиск, кПа;

$P$  – розрідження або надмірний тиск, кПа;

$t$  – температура газів, °С.

Електрична міцність газового проміжку може бути порушена іскровим або дуговим електричним розрядом при значному значенні напруги, що перевищує критичне значення. Зовнішнім виявом дугового розряду є збільшення споживання струму (рис. 8.2). На інтенсивність коронування суттєво впливає також хімічний склад газу. Наявність діоксиду вуглецю, водяної пари та сірчаного ангідриду збільшує робочу зони коронного розряду. При нормальних умовах напруженість електричного поля складає для діоксиду вуглецю 28,2, для повітря 35,5 та для азоту 38 кВ/см.

Процес електричного вловлювання частинок газових викидів в електрофільтрі характеризується трьома стадіями: зарядження завислих частинок, рух заряджених частинок до електродів та осаджування частинок на електродах. Зарядження завислих в газі частинок, що знаходяться в електричному полі корони, відбувається внаслідок абсорбції іонів з їх поверхнею. Частинки розміром більше 1 мкм заряджаються, в основному, іонами, що рухаються під дією сил електричного поля. Частинки менше 0,2 мкм заряджаються іонами, що беруть участь в дифузійному процесі за рахунок теплового руху газових молекул. Для частинок з діаметром 0,2...0,5 мкм ефективними є обидва механізми їх зарядки.

При збільшенні заряду частинки відштовхувальна сила між нею та однойменно зарядженими іонами також збільшується до тих пір, поки заряд на частинці не досягне максимального значення. Максимальний заряд частинок діаметром більше 1 мкм, при якому припиняється процес зарядження, обчислюється за формулою, Кл

$$q_{\text{max}} = \pi d^2 \epsilon_0 E_z \rho_e = n e, \quad (8.4)$$

де  $d$  – діаметр частинки, мкм;

$e$  – значення заряду електрона,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;

$n$  – число елементарних зарядів на частинці;

$\epsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму,  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$E_z$  – напруженість електричного поля коронного розряду в зоні знаходження частинок, В/м;

$\rho_e$  – показник діелектричних властивостей частинок, для провідних

$\rho_e = 3$ , а для діелектричних  $\rho_e = 1,2$ .

Швидкість зарядження частинок в звичайних умовах коронного розряду достатньо велика. Так близько за 0,1 с частинка набуває 90% максимального заряду.

В практичних умовах електричного очищення газів при температурі 150...400°C для частинок з діаметром менше 0,2 мкм максимальна величина заряду обчислюється за формулою, Кл

$$q_{\max} = 10^8 e d . \quad (8.5)$$

Електростатична сила, що діє на заряджену частинку в електронному полі, дорівнює, Н,

$$F_E = q E , \quad (8.6)$$

де  $E$  – напруженість електронного поля, В.

Швидкість осадження заряджених частинок в частині застосування закону Стокса розраховується за формулою

$$\omega_{oc} = \frac{q E C_k}{3 \pi \mu_T d} , \quad (8.7)$$

де  $C_k$  – поправка Кенінгена–Міллікена,

$\mu_T$  - динамічна в'язкість газу, Па·с;

$q$  - максимальний заряд частинок, що його обчислюють за формулами (8.4–8.5) в залежності від вихідних умов.

Аерозоль, в якому всі частинки мають однаковий заряд, рівномірно розсіюється під дією свого власного загального заряду. Швидкість розсіювання зарядженої аерозольної хмаринки характеризується рівнянням

$$1/C_1 - 1/C_2 = 4 q^2 C_k t / 3 d \mu_T , \quad (8.8)$$

де  $C_1$  – початкова концентрація частинок, см<sup>-3</sup>;

$C_2$  – концентрація частинок в момент часу  $t$ , см<sup>-3</sup>.

В будь-який момент в процесі електростатичного розсіювання концентрація аерозолю у всіх точках однакова. В зв'язку з цим рух середовища не впливає на розсіювання і рівняння (8.8) справедливо для аерозолів, що знаходяться в ламінарному та турбулентному режимі течії.

В випадку, коли до складу аерозолів входять позитивно й негативно заряджені частинки з різною концентрацією, то частинки, яких меншість, переміщуються до центра аерозольної хмаринки, де їх концентрація поступово збільшується. Густина заряду в цьому центральному ядрі починає зменшуватися до тих пір, поки воно не стане практично нейтральним. Одночасно розсіювання зовнішньої частини аерозолів, до складу яких входять частинки з однойменним зарядом, продовжується.

Внаслідок одночасного осаджування багатьох частинок на поверхні осаджувального електрода на ньому утворюється шар пилу, що перезаряджається. Тобто шар пилу отримує протилежний знак, що однаковий із знаком заряду осаджувального електрода. Час перезарядження визначається опором пилу, що міститься в газових викидах.

В залежності від питомого опору пилу, що осідає на електроді елект-



рофільтра, він ділиться на три групи.

Перша група – питомий електричний опір пилу до  $10^2$  Ом·м. Час розрядження шару такого пилу надто малий. Частинки при торканні поверхні електрода миттєво перезаряджаються. В результаті вони можуть відштовхуватися від електрода та знову потрапити в потік газів, що виходить з електрофільтра.

Друга група – питомий електричний опір пилу  $10^2 \dots 10^8$  Ом·м. Пил газових викидів добре осаджується на електродах та легко видаляється з них при струшуванні.

Третя група – питомий електричний опір пилу перевищує  $10^8$  Ом·м. Цей пил незадовільно вловлюється на електрофільтрах. Причиною цього є повільне розрядження частинок на електродах, що суттєво перешкоджає осадженню наступних частинок. Пил третьої групи незадовільно струшується з електродів, що ускладнює їх ефективну експлуатацію.

## **8.2 Технологічне обладнання для електричного очищення газових викидів**

Очищення газових викидів від забруднень електричним методом реалізується за допомогою електрофільтрів, класифікація яких наведена на рис. 8.3.

Агрегатами живлення електрофільтрів є регулятор напруги, підвищувальний трансформатор та високовольтний випрямляч. Ефективність роботи електрофільтра визначається робочою напругою, яка повинна наближатися до напруги пробую. Оптимальний режим роботи електрофільтрів забезпечується регулюванням напруги на електродах, яка повинна підтримуватися на максимально високому рівні. Напруга пробую в електрофільтрі залежить від кількості очищуваних газів, їх температури, вологості, густини, концентрації частинок в газах, наявності шару пилу на електродах тощо. Напруга пробую коливається в значних межах, особливо в сухих електрофільтрах.

Ступінь очищення в електрофільтрі визначається способом і режимом регенерації електродів. В сухих електрофільтрах для видалення пилу з осаджувальних та коронувальних електродів застосовується пружинно-кулачкова, ударно-молоткова, магнітно-імпульсна й вібраційна система струшування. Для видалення осаджених твердих частинок в мокрих електрофільтрах використовують безперервне або періодичне промивання електродів з подачею на них необхідної кількості промивної рідини, що змиває осаджений пил.

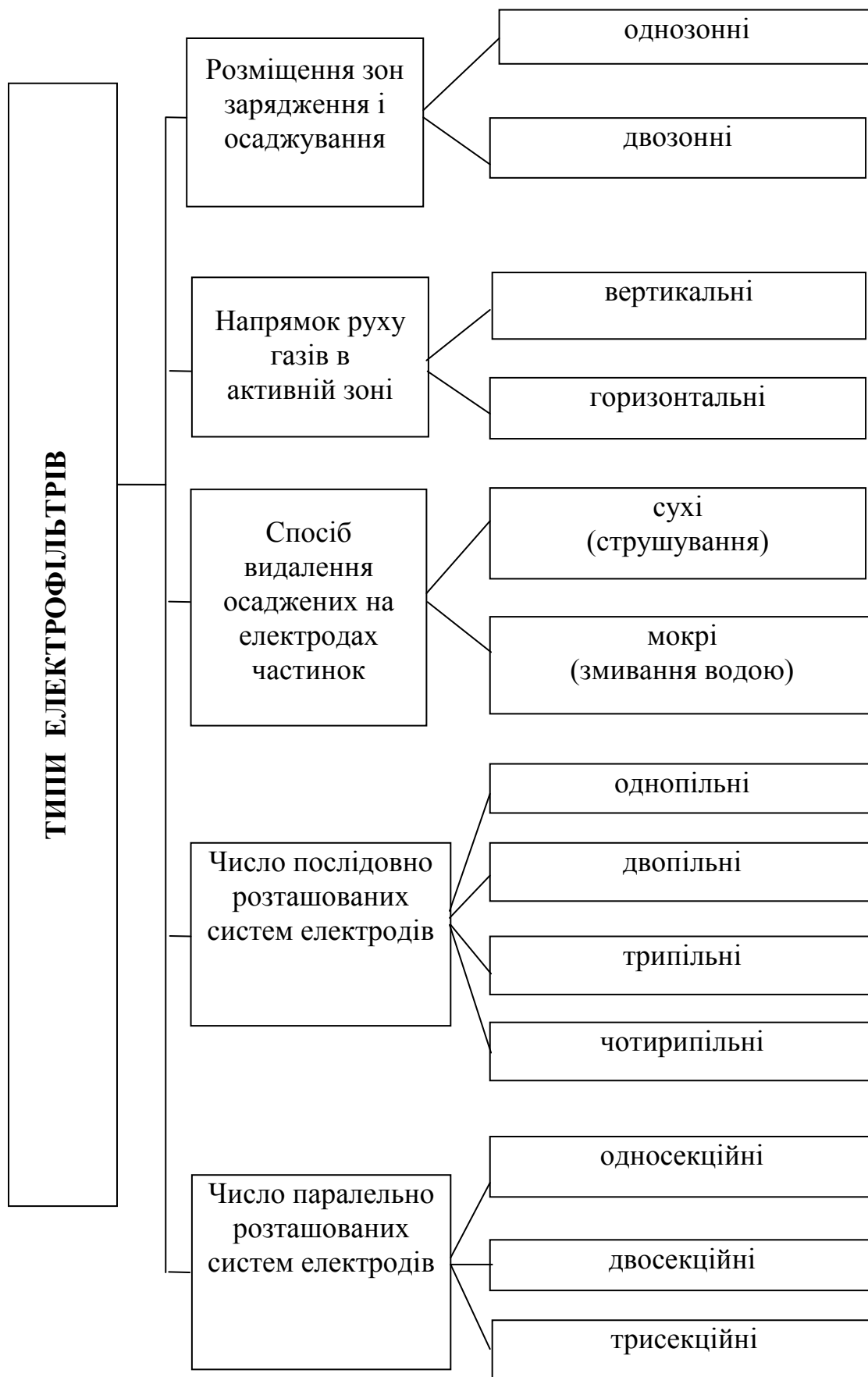


Рисунок 8.3 – Класифікація електрофільтрів

### 8.3 Суть магнітного методу очищення газових викидів

Магнітне очищення газових викидів ґрунтується на властивості магнітосприйнятливих частинок, що мають залізовмісні домішки парів і конденсатів, піддаватися магнітному осадженню та попутно виконувати “транспортну” функцію, захоплюючи інші частинки домішок та іони. Тому метод магнітного очищення газових викидів є більш універсальним порівняно з його прямим призначенням. Доцільно попередньо штучно вводити в потік газів, що очищаються, магнітосприйнятливі частинки з наступним сумісним осадженням їх з іншими домішками.

Газ, що очищається, пропускається через фільтрувальну (гранульовану) намагнічену насадку, що безпосередньо контактує з потоком газу чи рідини (рис. 8.4).

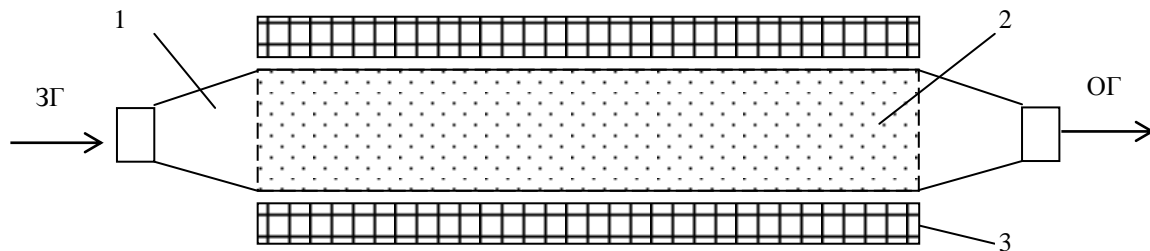


Рисунок 8.4 – Соленоїдний фільтр осаджувач:

1 – корпус; 2 – фільтрувальна насадка; 3 – соленоїд для створення магнітного поля

Перевагою гранульованих насадок є те, що при дії на них порівняно невеликим намагнічуючим полем в їх порах, переважно поблизу точок контакту гранул, формується поле високої напруженості з високим ступенем неоднорідності. Сформоване поле набагато перевищує напруженість намагнічуючого поля. Під дією цього поля частинки піддаються ефективній силовій осаджувальній дії. Внаслідок цього досягається тонке очищення газів від магнітосприйнятливих фракцій домішок частинок за умови наявності у гранул антикорозійних властивостей. При цьому магнітофільтраційне очищення відбувається при порівняно великих робочих швидкостях руху газових викидів, що очищаються. Швидкості в 3...10 разів більші порівняно з традиційним осадженням частинок, де проявляються тільки механічні й хімічні сили захоплення. Це дозволяє виготовляти установки для магнітного очищення компактними та високопродуктивними. Гранульовані насадки зберігають свої магнітні властивості при температурах до 800° С, що дозволяє використовувати їх для очищення газових викидів, які знаходяться в різних температурних режимах.

Якщо тверда частинки не має природних магнітосприйнятливих влас-

тивостей, то механізм її переміщення в магнітному полі такий: при русі в газовому потоці з певною швидкістю частинка одержує електричний заряд. При потраплянні частинки в магнітне поле певної напруженості на неї буде діяти сила, що перпендикулярна до напрямку магнітного поля та до напрямку руху частинки. В результаті дії цих сил частинка змішується зі швидкістю, яка може бути визначена за законом Стокса

$$\omega = \frac{C_K q H V_r m_a m_b}{3 \pi \mu_r d}, \quad (8.9)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля, А/м;

$V_r$  - швидкість руху газового потоку, м/с;

$m_a$  - абсолютна магнітна проникність вакууму,  $1,257 \cdot 10^{-6}$  Г/м;

$m_b$  - відносна магнітна проникність.

Якщо малі магнітні частинки потрапляють в магнітне поле, то вони орієнтуються таким чином, що їх протилежні кінці направлені до різних полюсів магніту. Сумарна сила, що діє на частинку в магнітному полі, рівна алгебраїчній сумі сил притягування та відштовхування.

#### 8.4 Технологічне обладнання для магнітного очищення газових викидів

Очищення газових викидів від забруднень магнітним методом реалізується за допомогою технологічного обладнання, класифікація якого в залежності від особливостей намагнічувальних систем та їх компоновки з зоною осадження домішок наведена на рис. 8.5.



Рисунок 8.5 – Класифікація магнітних фільтрів

В електромагнітних фільтрах з осердя-насадкою робоча насадка розміщена безпосередньо в порожнині намагнічувальних катушок. Насадка в цих конструкціях є своєрідним осердямамагнічувальної катушки.

Багатополюсні фільтри з “відділеними” електромагнітами мають зна-

чну кількість малогабаритних котушок із стальними осердями-магнітопроводами, що розташовані за межами насадки і направлені своїми полюсами на насадки. В цих фільтрах осердя разом з насадкою складають замкнутий магнітний контур.

Фільтри з “відділеними” постійними магнітами мають пакети постійних магнітів. Ці пакети є намагнічувальними системами з можливістю управління ними для періодичного переривання магнітної дії на фільтрувальну насадку. Пакети постійних магнітів не є осаджувальними елементами. В цих апаратах відсутнє або різко обмежене використання обмотувального проводу, споживання електроенергії, полегшується їх застосування у вибухонебезпечних умовах, коли необхідне спеціальне електричне оснащення.

В електромагнітних фільтрах з осердям-насадкою й багатополюсних фільтрах з “відділеними” електромагнітами переривання магнітної дії здійснюється відключенням струму живлення.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

1. Охарактеризуйте електричний метод очищення газових викидів.
2. Як змінюється сила струму із збільшенням напруги в електрофільтрі?
3. Поясніть від чого залежить максимальний заряд частинок, при якому припиняється процес зарядки.
4. Від чого залежить швидкість осадження заряджених частинок в електрофільтрі?
5. Охарактеризуйте групи пилу, що осідає на електроді, в залежності від його питомого опору.
6. Наведіть класифікацію електрофільтрів.
7. За рахунок чого збільшується ступінь очищення в електрофільтрах?
8. Охарактеризуйте магнітне очищення газових викидів.
9. Від яких факторів залежить швидкість руху частинок в магнітному полі?
10. Розкрийте особливості існуючих магнітних фільтрів.

## Література

1. Закон України “Про охорону атмосферного повітря”. – К.: 1992. – 8 с.
2. Албовский А.Н., Анцев Б.В., Романовский С.А. Газоснабжение и очистка промышленных газов. – К.: Вища школа, 1985. – 190 с.
3. Балабеков О.С., Балтаев Л.Ш. Очистка газов в химической промышленности. – М.: Химия, 1991. – 252 с.
4. Вальдберг А.Ю. и др. Технология пылеулавливания. – Л.: Машиностроение, 1985. – 423 с.
5. Власенко В.М. Каталитическая очистка газов. – К.: Техника, 1973.–200 с.
6. Гордон Г.М., Пейсанов И.Л. Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
7. Гушля А.В., Мезенцев В.С. Воднобалансовые исследования. – К.: Вища школа, 1982. – 239 с.
8. Денисенко Г.Ф. Охрана окружающей среды в черной металлургии. – К.: Техника, 1990. – 246 с.
9. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1976.–516 с.
10. Клименко Л.П. Техноекологія. – Сімферополь: Таврія, 2000. – 542 с.
11. Константинов З.И. Защита воздушного бассейна от промышленных выбросов. – М.: Стройиздат, 1981. – 104 с.
12. Кузнецов И.Е. и др. Оборудование для санитарной очистки газов: Справочник. – К.: Техника, 1989. – 304 с.
13. Лялюк О.Г., Ратушняк Г.С. Моніторинг атмосферного повітря. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 94 с.
14. Очистка технологических газов. Под ред. Семеновой Т.А., Аейтеса И.Л. – М.: Химия, 1968. – 392 с.
15. Панов Г.Е., Петряшин Л.Ф., Лысяный Г.Н. Охрана окружающей среды на предприятиях нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1986. – 245 с.
16. Пивощенко І.М. Клімат Вінницької області. – Вінниця: ВАТ “Віноблдукарня”, 1997. – 240 с.
17. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1998. – 296 с.
18. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
19. Ратушняк Г.С. Инженерные изыскания и специальные гидроклиматические исследования. – К.: УМК ВО, 1991. – 116 с.
20. Рихтер Л.А., Волков Э.П., Покровский В.Н. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов ТЭС. – М.: Энергоиздат, 1981. – 295 с.
21. Сандуляк А.В. Новое в технике и технологии физических методов очистки жидкостей и газов. – К.: Вища школа, 1989. – 55 с.
22. Северин Л.І. Захист атмосфери. ч.1 та 2. – Вінниця: ВПІ, 1994. – 177 с.

23. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1977. – 294 с.
24. Сердюк В.Р., Лялюк О.Г. Організаційно-технологічне забезпечення зниження радіаційної небезпеки в будівництві. –Вінниця: ВДТУ, 1999. – 74 с.
25. СНиП 2.02.-01-82. Строительная климатология и геофизика. – М.: Стройиздат, 1983. – 76 с.
26. СНИП 2.04.05-86. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – М.: Стройиздат, 1987. – 66 с.
27. Справочник по пыле- и золоулавливанию. Под общ. ред. Русанова А.А. – М.: Машиностроение, 1989. – 448 с.
28. Страус В.К. Промышленная очистка газов. Перевод с английского. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
29. Ужов В.Н. и др. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1991. – 362 с.
30. Хмыров В.Н., Фисак В.Н. Термическое обезвреживание промышленных газовых выбросов. – Алма-Ата: Наука, 1978. – 118 с.
31. Энергетика и охрана окружающей среды. Под ред. Залогина Н.Г и др. – М.: Энергия, 1979. – 352 с.

*Навчальне видання*

Ратушняк Г.С.

## **Теоретичні основи технології очищення газових викидів**

**Навчальний посібник**

Оригінал-макет підготовлено автором

Редактор В.О. Дружиніна

Підписано до друку 24.04.02 р.

Формат 29,7x42  $\frac{1}{4}$  Гарнітура Times New Roman

Друк різнографічний Ум. друк. арк.

Тираж 75 прим.

Зам. № 2002-120

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького державного технічного університету  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ, ГНК, 9-й поверх  
Тел. **(0432) 44-01-59**



