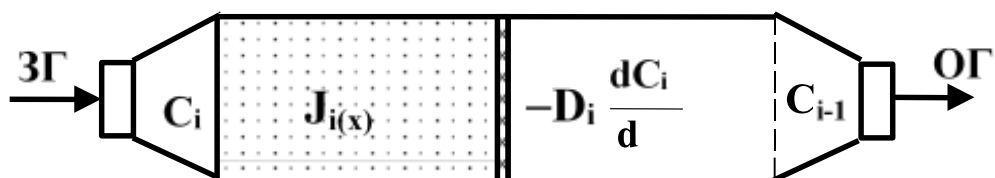


Г. С. Ратушняк

МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ ТА  
ТЕОРЕТИЧНІ  
ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ  
ВИКИДІВ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

Г. С. Ратушняк

**МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ ТА  
ТЕОРЕТИЧНІ  
ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ  
ВИКИДІВ**

*Електронний навчальний посібник*

Видання 2-е, перероблене та доповнене

Вінниця  
ВНТУ  
2026

**УДК 66.074**  
**P25**

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти та науки України (протокол № 5 від 27.11.2025 р.)

**Рецензенти:**

В. М. Желих, доктор технічних наук, професор

І. В. Коц, кандидат технічних наук, доцент

К. М. Предун, доктор економічних наук, професор

**Ратушняк, Г. С.**

**P25** Моніторинг довкілля та теоретичні основи очищення газових викидів : навчальний посібник [Електронний ресурс] / Ратушняк Г. С. – [2-ге вид., перероб. і доп.]. – Вінниця : ВНТУ. 2026. – (PDF, 164 с.).

Навчальний посібник присвячено матеріалам лекційного курсу з дисципліни «Моніторинг та теоретичні основи очищення газових викидів» для здобувачів, що навчаються за спеціальністю G19 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання.

В посібнику наведено загальні аспекти моніторингу атмосфери, гідросфери та літосфери, організація спостережень за забрудненням та прогнозуванням їхнього стану. Наведено фізичні основи сухого та мокрого очищення газів від пилу, очищення газів від газо- пароподібних забруднень абсорбційним та адсорбційним методами, каталітичним та термічним, а також електричним та магнітним знешкодженням.

УДК 66.074

## ЗМІСТ

Передмова .....	5
1 МЕТА МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ ТА ЗАГАЛЬНІ АСПЕКТИ ІНЖЕНЕРНИХ МЕТОДІВ ОХОРОНИ БІОСФЕРИ.....	7
1.1 Мета та функції моніторингу довкілля .....	7
1.2 Управління охороною довкілля та раціональним природокористуванням.....	10
2 ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА РІВНЕМ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ.....	14
2.1 Мета, види та організація обстеження стану атмосфери .....	14
2.2 Методи й технічні засоби визначення шкідливих речовин в атмосферному повітрі .....	20
2.3 Методи й засоби лабораторного та автоматичного контролю стану атмосферного повітря .....	26
2.4 Прогнозування в системі моніторингу атмосферного повітря .....	33
2.4.1 Моделювання та оцінювання якості повітряного басейну .....	33
2.4.2 Прогнозування забруднення атмосферного повітря .....	41
3 МОНІТОРИНГ ГІДРОСФЕРИ.....	44
3.1 Характеристика водних об'єктів, водні ресурси та їх використання	44
3.2 Загальні аспекти забруднення гідросфери.....	51
3.3 Організація спостережень за забрудненням водного середовища..	53
3.4 Оцінювання якості водного басейну та прогнозування його стану...	58
4 МОНІТОРИНГ ЛІТОСФЕРИ.....	64
4.1 Ґрунтово-земельні ресурси літосфери та антропогенний вплив на них.....	64
4.2 Організація спостережень за забрудненням ґрунтів .....	68
4.3 Оцінювання якості ґрунтів та прогнозування їх стану .....	71
5 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧОВИН, ЩО ЇЇ ЗАБРУДНЮЮТЬ.....	78
5.1 Радіаційні процеси в атмосфері та її тепловий і вологісний режими.....	78
5.2 Атмосферний тиск та рух повітря .....	85
5.3 Перенесення забруднювачів в атмосфері .....	88
5.4 Забруднювальні речовини, їх типи та властивості пилу й газів .....	90
5.5 Радіоактивні забруднювачі .....	96
6 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ПИЛУ ....	100
6.1 Загальні відомості про фізичні основи технології очищення газів від пилу.....	100
6.2 Гравітаційне осадження частинок.....	101
6.3 Інерційне осадження частинок .....	103
6.4 Відцентрове осадження частинок.....	106
6.5 Дифузійне осадження частинок.....	108
6.6 Осадження частинок за рахунок зачеплення.....	110

6.6	Ефективність очищення газів від пилу та технологічне обладнання .....	111
7	ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ГАЗО-Й ПАРОПОДІБНИХ ЗАБРУДНЕНЬ АБСОРБЦІЙНИМ МЕТОДОМ ..	116
7.1	Суть абсорбційного методу очищення газових викидів та рівновага в системі газ-рідина.....	116
7.2	Кінетика процесу абсорбції.....	120
7.3	Технологічне обладнання для абсорбційного очищення газових викидів.....	124
8	ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ГАЗО- Й ПАРОПОДІБНИХ ЗАБРУДНЕНЬ АДСОРБЦІЙНИМ МЕТОДОМ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ. ПРИНЦИП МЕТОДУ. АПАРАТИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВИКИДІВ. КІНЕТИКА ПРОЦЕСУ .....	129
8.1	Суть адсорбційного методу очищення газових викидів .....	129
8.2	Рівновага й швидкість адсорбції.....	131
8.3	Характеристика адсорбентів .....	134
8.4	Технологічне обладнання для адсорбційного очищення газів від газо- й пароподібних забруднень .....	138
9	ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ КАТАЛІТИЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ТА ТЕРМІЧНОГО ЗНЕШКОДЖЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ .....	141
9.1	Суть каталітичного методу очищення газових викидів .....	141
9.2	Характеристика каталізаторів .....	144
9.3	Технологічне обладнання для каталітичного очищення газів .....	147
9.4	Суть термічного знешкодження парогазових викидів .....	149
9.5	Технологічне обладнання для термічного знешкодження парогазових викидів в топкових пристроях .....	150
9.6	Технологічне обладнання для знешкодження парогазових викидів в факельних пристроях .....	152
10	ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА МАГНІТНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ .....	154
10.1	Суть електричного методу очищення газових викидів.....	154
10.2	Технологічне обладнання для електричного очищення газових викидів.....	158
10.3	Суть магнітного методу очищення газових викидів .....	160
10.4	Технологічне обладнання для магнітного очищення газових викидів.....	161
	ЛІТЕРАТУРА.....	163

## Передмова

Правові й організаційні основи та екологічні вимоги з погляду моніторингу довкілля з метою регулювання відносин в цій галузі, збереження, поліпшення й відтворення його стану, а також посилення правопорядку та законності в цій сфері передбачено законодавством України [1, 2, 3].

Щорічно більше 160 млн. т діоксиду сірки та дещо менше оксидів азоту викидається в атмосферу Землі як результат антропогенної діяльності. Внаслідок цього випадають кислотні дощі, які є причиною щорічних збитків. За останні 200 років людство збільшило вміст оксидів вуглецю в атмосфері на 25 % за рахунок спалювання органічних речовин. Внаслідок виникнення парникового ефекту збільшується температура Землі, що може призвести до небажаних екологічних, економічних та соціальних наслідків.

Оптимальні з природоохоронних позицій проєктування, будівництво й експлуатація об'єктів мають визначатися з врахуванням екологічних показників та характеристик, виходячи з керівного критерію – пріоритету інтересів провідного природокористувача, тобто людини.

Моніторинг довкілля базується на сучасних методах дослідження проблеми взаємодії природи й суспільства, що ґрунтується на математичних моделях збереження й перетворення енергії та речовини між компонентами географічної оболонки з врахуванням антропогенних факторів.

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. В процесі спалювання 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 енергозберіжних 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. Залежно від типу забруднювачів та їхніх 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 має бути економічно обґрунтованою.

Проблема якісної підготовки фахівців для будівельної галузі для спеціалізованих проєктних, будівельно-монтажних й експлуатаційних організацій знаходиться в тісному взаємозв'язку з отриманням ними знань щодо моніторингу довкілля та вибору раціонального обладнання для очищення газових викидів. Вирішення цієї задачі потребує відповідного методичного забезпечення навчального процесу, яке б дозволяло отримувати компетенції вирішувати складні інженерно-технічні задачі з захисту навколишнього середовища від негативних наслідків антропогенної дії на нього.

Матеріал посібника враховує специфіку програм дисциплін, що викладаються в процесі підготовки фахівців з ОП «Теплогазопостачання й вентиляція» та «Енергоефективні системи створення мікроклімату» й призначений активізувати самостійну роботу студентів. З огляду на сказане окремі теоретичні положення мають специфічну методику викладення, яка роз'яснює теорію та суть питань, що розглядаються.

До складу навчального посібника увійшли матеріали, що використовують в навчальному процесі під час підготовки бакалаврів та магістрів для будівельної галузі, а саме навчальні посібники «Моніторинг довкілля» авторів О. Г. Лялюк, Г. С. Ратушняка та «Теоретичні основи очищення газових викидів» автора Ратушняка Г. С.

Розділи 1, 2, 3, 4 написано Лялюк О. Г. та Ратушняком Г. С., а розділи 5, 6, 7, 8, 9, 10 написано Ратушняком Г. С.

# 1 МЕТА МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ ТА ЗАГАЛЬНІ АСПЕКТИ ІНЖЕНЕРНИХ МЕТОДІВ ОХОРОНИ БІОСФЕРИ

## 1.1 Мета та функції моніторингу довкілля

Природне середовище як сполучення природних та природно-антропогенних тіл й факторів, що впливають на природні ресурси та економічні показники господарчої діяльності, постійно знаходиться у взаємодії з об'єктами урбанізованої території. Урбанізована територія та техногенні системи в існуючій практичній реалізації не завжди виступають як одне логічно ціле. Якщо на навколишнє середовище діють нерегульовані техногенні процеси, то це викликає негативні явища. Як результат – виникає необхідність в створенні природно-технологічних комплексів, в яких сполучення елементів технічних систем з природним середовищем відбувається за принципами забезпечення цілісності, організованості та керованості.

**Система моніторингу довкілля** – це система спостережень, збирання, оброблення, передавання, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін і розроблення науково-обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативним змінам стану довкілля та дотримання вимог екологічної безпеки.

Система моніторингу – це відкрита інформаційна система. Її пріоритетами функціонування є захист життєво важливих екологічних інтересів людини і суспільства, збереження природних екосистем, відвернення кризових змін екологічного стану довкілля і запобігання надзвичайним екологічним ситуаціям.

Створення і функціонування системи моніторингу з метою інтеграції екологічних інформаційних систем, що охоплюють певні території, ґрунтуються на принципах:

- узгодженості нормативно-правового та організаційно-методичного забезпечення;
- сумісності технічного, інформаційного і програмного забезпечення її складових частин;
- систематичності спостережень за станом довкілля та техногенними об'єктами, що впливають на нього;
- своєчасності отримання, комплексності оброблення та використання екологічної інформації, що надходить і зберігається в системі моніторингу;
- об'єктивності первинної, аналітичної і прогнозної екологічної інформації та оперативності її доведення до органів виконавчої влади й місцевого самоврядування, населення та громадських організацій, засобів інформації, заінтересованих міжнародних установ та світового співтовариства.

Моніторинг довкілля здійснюється центральними державними органами та їх підрозділами на місцях, а також підприємствами, установами та організаціями, що належать до сфери їх управління. Ці органи та підрозділи є суб'єктами системи моніторингу за загальнодержавною і регіональними програмами реалізації відповідних природоохоронних заходів.

Фінансування робіт із створення і функціонування системи моніторингу та її складових частин здійснюється відповідно до порядку фінансування природоохоронних заходів за рахунок коштів, передбачених у державному та місцевих бюджетах згідно із законодавством. Покриття певної частини витрат на створення і функціонування складових частин і компонентів системи моніторингу може здійснюватися за рахунок інноваційних фондів у межах коштів, передбачених на природоохоронні заходи, міжнародних грантів та інших джерел фінансування.

Система моніторингу спрямована на:

- підвищення рівня вивчення і знань про екологічний стан довкілля;
- підвищення оперативності та якості інформаційного обслуговування користувачів на всіх рівнях;
- підвищення якості обґрунтування природоохоронних заходів та ефективності їх здійснення;
- сприяння розвитку міжнародного співробітництва у галузі охорони довкілля, раціонального використання природних ресурсів та екологічної безпеки.

**Основними завданнями** суб'єктів системи моніторингу є:

- довгострокові систематичні спостереження за станом довкілля;
- аналіз екологічного стану довкілля та прогнозування його змін;
- інформаційно-аналітична підтримка прийняття рішень у галузі охорони довкілля, раціонального використання природних ресурсів та екологічної безпеки;
- інформаційне обслуговування органів виконавчої влади та місцевого самоврядування, а також забезпечення екологічною інформацією населення країни і міжнародних організацій.

Система моніторингу ґрунтується на використанні існуючих організаційних структур суб'єктів моніторингу. Вона функціонує на основі єдиного нормативного організаційного, методологічного і метрологічного забезпечення, об'єднання складових частин та уніфікованих компонентів цієї системи.

**Методологічне забезпечення** об'єднання складових частин і компонентів системи моніторингу здійснюється на основі:

- єдиної науково-методичної бази щодо вимірювання параметрів і визначення показників стану довкілля, біоти і джерел антропогенного впливу на них;
- впровадження уніфікованих методів аналізу і прогнозування властивостей довкілля, комп'ютеризації процесів діяльності та інформаційної комунікації;
- загальних правил створення і ведення розподілених баз та банків даних і знань, картування й картографування екологічної інформації,

стандартних технологій з використанням географічних інформаційних систем.

**Метрологічне забезпечення** об'єднання складових частин і компонентів системи моніторингу здійснюється на основі:

- єдиної науково-технічної політики щодо стандартизації, метрології та сертифікації вимірювального, комп'ютерного і комунікаційного обладнання;

- єдиної нормативно-методичної бази, що забезпечує достовірність і порівнянність вимірювань і результатів оброблення екологічної інформації в усіх складових частинах цієї системи.

**Мета моніторингу** – виявити критичні та екстремальні ситуації, фактори антропогенної дії на довкілля, проводити оцінювання, моделювання й прогнозування стану об'єктів спостереження, керувати дією й впливом об'єктів техносфери, атмосфери, гідросфери і літосфери.

Блок-схему моніторингу довкілля як системи загалом подано на рис. 1.1.

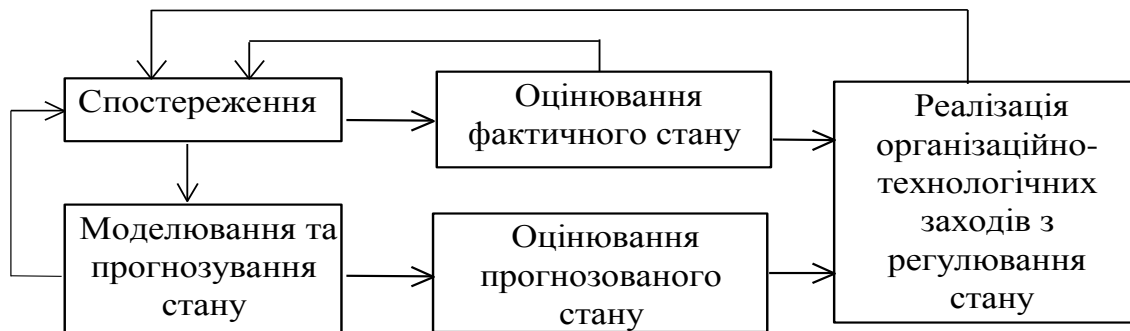


Рисунок 1.1 – Блок-схема системи моніторингу довкілля

Існує три рівні спостереження за станом навколишнього середовища: космічні з супутників або пілотованих кораблів; аероспостереження з літаків; наземні – рухомі, нерухомі та стаціонарні.

**Види моніторингу:** медико-біологічний – тобто контроль факторів, що пов'язані із здоров'ям людини; екологічний – контроль стану екосистеми; кліматичний – контроль за станом клімату.

#### **Основні функції моніторингу:**

- контроль за станом атмосфери, гідросфери та літосфери;
- контроль за джерелами забруднення, що впливають на зміну екологічної рівноваги довкілля;
- моделювання та прогнозування екологічного стану атмосфери, гідросфери та літосфери;
- керування за допомогою організаційно-технологічних заходів екологічними процесами.

Для отримання повної та оперативної інформації про стан довкілля використовуються засоби контролю екологічних систем. За впливом на

об'єкти довкілля вони бувають контактні та неконтактні. Контактні засоби контролю базуються на фізико-хімічних процесах за безпосереднього контакту з досліджуваним об'єктом. Неконтактні засоби контролю базуються на властивостях електромагнітного, гравітаційного чи акустичного поля, що зондується, переносити інформацію до відповідних датчиків під час взаємодії з досліджуваним об'єктом. Неконтактні засоби контролю бувають активні та пасивні. Активні – прийом відбитого, проникаючого зондувального поля, створеного стороннім джерелом енергії. Пасивні – прийом зондувального поля безпосередньо від об'єкта контролю екологічної системи.

Залежно від контрольованих показників довкілля засоби контролю поділяють на структурні та функціональні. До структурних відносяться такі, що контролюють абсолютні або відносні значення фізико-хімічних чи біологічних параметрів, а до функціональних – продуктивність, швидкість та кругообіг речовин.

Моделювання якості довкілля базується на основі інформації про шкідливі викиди за результатами інвентаризації стаціонарних та пересувних джерел забруднення. Методи моделювання ґрунтуються на законах, що описують процес дифузії, переносу і розсіювання шкідливих речовин в навколишньому середовищі.

Під час прогнозування стану забруднення довкілля оцінюється санітарна ситуація в районі та перспективи її розвитку. Методи прогнозування базуються на результатах теоретичного й експериментального дослідження закономірностей поширення шкідливих інгредієнтів від їх джерел.

Управління моніторингу довкілля являє собою програмний комплекс, об'єднаний в систему постійно діючих моделей, в яких зміни стану одного з природних факторів або техногенного навантаження відображаються в вигляді ідентифікованої реакції об'єкта управління.

## **1.2 Управління охороною довкілля та раціональним природокористуванням**

**Екологічна політика** – це сфера діяльності держави, пов'язана з охороною довкілля, раціональним природокористуванням та забезпеченням екологічної безпеки життєдіяльності людини.

Ефективна екологічна політика базується на дієвому законодавстві, впровадження в життя якого забезпечують відповідні структури управління природоохоронною діяльністю.

Закон України «Про охорону навколишнього середовища» передбачає систему гарантій екологічної безпеки людини, забезпечує певну впорядкованість в системі управління охороною довкілля й природокористуванням та проведення єдиної науково-технічної політики в цій сфері. Закон містить положення з таких питань:

- екологічні права та обов'язків громадян, повноваження місцевих органів влади в галузі охорони довкілля;
- повноваження органів управління в галузі охорони довкілля;
- спостереження, прогнозування, облік та інформування;
- екологічні експертизи;
- стандартизація і нормування;
- контроль і нагляд, регулювання природокористування, економічний механізм забезпечення охорони довкілля;
- заходи щодо забезпечення екологічної безпеки;
- природні території та об'єкти, що потребують особливої охорони;
- надзвичайні екологічні ситуації;
- вирішення суперечок;
- відповідальність за порушення законодавства про охорону довкілля;
- міжнародні відносини.

Головними складовими механізму реалізації державної екологічної політики є:

- державна інституційна інфраструктура проведення природоохоронної політики;
- законодавчо-правовий механізм регулювання виробничої діяльності юридичних і фізичних осіб щодо охорони й використання ними природних ресурсів та поводження з відходами виробництва;
- економічний механізм природокористування та природоохоронної діяльності;
- механізм реалізації міжнародних, національних, галузевих та місцевих природоохоронних програм.

Державна екологічна політика реалізується за трьома рівнями управління: національним, регіональним та місцевим.

До функцій **національного** рівня управління належить вирішення таких питань:

- розроблення методологічного, нормативно-методичного та правового забезпечення;
- розроблення політики регулювання ядерної безпеки;
- проведення державної екологічної експертизи;
- формування економічного механізму природокористування;
- регулювання використання природних ресурсів та запобігання забрудненню довкілля;
- ліцензування екологічно небезпечних видів діяльності;
- державна політика щодо зон надзвичайних екологічних ситуацій;
- встановлення нормативів якісного стану природних ресурсів;
- формування та використання державних фондів охорони довкілля;
- регулювання використання ресурсів державного значення;
- державний контроль за дотриманням природоохоронного законодавства, зокрема ядерної та радіаційної безпеки;
- впровадження екологічного аудиту;

- проведення єдиної науково-технічної політики щодо охорони, раціонального використання та відновлення природних ресурсів;
- проведення державної політики щодо збереження біорізноманіття;
- забезпечення екологічної безпеки як складової національної безпеки;
- реалізація міжнародних угод і виконання Україною взятих на себе в рамках цих угод зобов'язань та підтримання міждержавних відносин у природоохоронній сфері;
- забезпечення процесу прийняття державних рішень з урахуванням екологічних вимог (організація моніторингу, впровадження інформаційних технологій, ведення обліку забруднень, прогнозування);
- екологічна освіта та екологічне виховання.

До функцій **регіонального** рівня екологічного управління належить вирішення таких питань:

- регулювання використання природних ресурсів місцевого значення;
- визначення нормативів забруднення природного середовища (встановлення нормативів ГДВ, ГДС та розміщення відходів);
- впровадження економічного механізму природокористування;
- проведення моніторингу та обліку об'єктів природокористування і забруднення довкілля;
- проведення державної екологічної експертизи;
- здійснення державного контролю за дотриманням природоохоронного законодавства;
- розроблення програм впровадження природоохоронних заходів, визначення та реалізація інвестиційної політики;
- інформування населення та заінтересованих підприємств, установ і організацій з екологічних питань.

До функцій **місцевого** рівня екологічного управління належить вирішення таких основних питань:

- проведення локального та об'єктного моніторингу;
- здійснення державного контролю за дотриманням природоохоронного законодавства;
- організація розробки місцевих екологічних програм та проєктів.

Основними **елементами політики екологічного управління** в Україні є:

- **система норм якості** повітря, вод, ґрунтів;
- **процедура видачі дозволів** на кожне основне стаціонарне джерело забруднення, яка визначає гранично допустимі рівні надходження забруднювальних речовин у довкілля і приводить їх у відповідність з нормами якості складових навколишнього середовища;
- **екологічний моніторинг та природоохоронні заходи**, спрямовані на забезпечення діяльності підприємств згідно з вимогами дозволів, і які передбачають можливість накладання штрафів та стягнень на порушників;

- **система зборів** за використання природних ресурсів та забруднення навколишнього природного середовища (економічний механізм регулювання природокористування);

- аналіз методом **екологічної експертизи** проєктів економічного розвитку (за аналогією з оцінюванням впливу на навколишнє середовище, що застосовується у зарубіжній природоохоронній практиці).

Фундаментом екологічного управління є система екологічних **норм якості** повітря, води й ґрунтів і пов'язана з нею система видачі **дозволів на норми граничного впливу** на довкілля. Екологічні норми якості компонентів довкілля використовуються для визначення обмежень для підприємств на викиди і скиди забруднювальних речовин у навколишнє середовище – нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ) та скидів (ГДС).

Єдина державна система екологічного моніторингу – це автоматизована інформаційна система, яка на сучасному науково-технічному рівні забезпечує збирання, обробку, збереження та аналіз екологічної інформації, комплексне оцінювання і прогнозування стану природного середовища та здоров'я населення, розроблення обґрунтованих рекомендацій для прийняття ефективних природоохоронних, економічних, соціальних та інших рішень на всіх рівнях виконавчої влади та вдосконалення відповідних законодавчих і нормативно-правових актів.

Ефективним інструментом запобігання деградації природного середовища в Україні є **державна екологічна експертиза** – вид експертної діяльності, що здійснюється з метою забезпечення контролю за відповідністю проєктних рішень вимогам природоохоронного законодавства, діючих нормативно-технічних та інструктивно-методичних документів у галузі охорони довкілля і використання природних ресурсів. Державній екологічній експертизі підлягають проєкти схем і розміщення продуктивних сил, розвитку галузей, техніко-економічні обґрунтування проєктів та проєкти на будівництво і реконструкцію об'єктів, проєкти інструктивно-методичних і нормативно-технічних актів, документація на створення нової техніки, технологій, матеріалів і речовин. Висновки державної екологічної експертизи є обов'язковими до виконання.

## **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Дайте означення системи моніторингу. На яких принципах вона ґрунтується та на що спрямована?
2. Наведіть блок-схему системи моніторингу.
3. Які види та функції моніторингу?
4. Охарактеризуйте структурну модель національної системи екологічного моніторингу.
5. Яка мета управління охороною довкілля?
6. Охарактеризуйте рівні управління державною екологічною політикою.

## 2 ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ПРОВЕДЕННЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА РІВНЕМ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ

### 2.1 Мета, види та організація обстеження стану атмосфери

Обстеження стану забруднення атмосферного повітря виконують з метою виявлення кількості шкідливих інгредієнтів; встановлення їх впливу на довкілля та здоров'я людей; розробки організаційно-технічних заходів з охорони навколишнього середовища.

Обстеження виконують трьох видів: оперативне, епізодичне та комплексне.

*Оперативне обстеження* виконується за спеціальною програмою для визначення різкого погіршення якості повітря.

*Епізодичне обстеження* виконується для приблизного оцінювання стану забруднення повітря та вибору місця для стаціонарного поста.

*Комплексні обстеження* організовуються для кількісного оцінювання стану атмосфери, детального вивчення особливостей і причин високого рівня концентрації забруднювальних речовин, для визначення метеорологічних особливостей поширення домішок в атмосфері, впливу на здоров'я людей і довкілля та розробки заходів для їх усунення.

Для врахування можливих змін погоди та забезпечення достатньої надійності висновків спостереження за станом забруднення виконують в різні періоди протягом двох-трьох років. Основні етапи комплексного обстеження:

- попереднє ознайомлення з об'єктом;
- проведення спеціальних експериментальних робіт;
- виконання метеорологічних спостережень;
- обстеження повітряного басейну промислового району;
- обробка та аналіз матеріалів.

Під час попереднього обстеження з об'єктом виконують такі заходи:

- вивчення загальної фізико-географічної характеристики району; розміщення основних джерел забруднення житлових і промислових районів, водних об'єктів;

- оцінювання загального рівня забруднення за існуючими матеріалами;
- ознайомлення з основними принципами технології виробництва, а також з кількісною характеристикою викидів шкідливих речовин за всіма інгредієнтами, умовами переносу й розсіювання викидів та їх стабільністю протягом доби;

- з'ясування з іншими організаціями питань про спільне виконання обстежень.

За результатами попередніх обстежень складають програму комплексних експериментальних робіт обстеження стану атмосфери, що містить:

- визначення хімічного складу атмосферного повітря за даними стаціонарних й маршрутних постів та підфакельних спостережень;
- визначення параметрів викидів в атмосферу;
- оцінювання рівня забруднення пересувними джерелами викидів;
- спостереження за метеорологічним режимом;
- визначення хімічного складу опадів;
- медико-біологічне обстеження території, а саме: стан здоров'я та показники захворювання людей, дія забруднювальних речовин на рослини, тварини та ґрунти.

Для оцінювання рівня забруднення атмосферного повітря створюється мережа постів на території населених пунктів та великих промислових об'єктів. **Пост** – це місце в населеному пункті, на якому розміщено автомобіль або павільйон з відповідним обладнанням для реєстрації інгредієнтів, що забруднюють повітря. Пости спостережень є трьох категорій: стаціонарні, маршрутні та пересувні (підфакельні).

**Стаціонарний пост** забезпечує неперервну реєстрацію забруднювальних речовин в атмосферному повітрі.

Маршрутний пост призначений для регулярного відбирання проб, коли немає можливості встановити стаціонарний, або необхідно детально вивчити характер забруднення якого-небудь району міста.

Пересувний пост влаштовують з метою вивчення характеру поширення шкідливих викидів від окремих джерел залежно від метеорологічних умов та оцінення впливу цих джерел на забруднення атмосферного повітря.

Точність аналізу відібраної проби суттєво залежить від місця розміщення поста спостереження. Вибору місця розміщення постів передують проведення попередніх маршрутних спостережень за рівнем забруднення повітря в різних районах населеного пункту. Для отримання повної та якісної інформації про забруднення атмосферного повітря стаціонарні пости доцільно розміщувати в кварталах житлової забудови та в районах промислових підприємств, де найбільші викиди шкідливих речовин. Обов'язково розміщують пости на територіях, що розміщені близько до дорожніх магістралей з інтенсивним рухом транспорту. Для порівняльного оцінення один із стаціонарних постів розміщують в зоні відносно чистого повітря.

Місцеположення стаціонарних постів спостереження за забрудненням атмосфери вибирається спільно з гідрометеорологічною та санітарно-епідеміологічною службою й узгоджується з головним архітектором міста. Під час вибору місця розташування постів особливу увагу звертають на наявність джерел викидів та їх потужність, частоту викидів і характер шкідливих речовин, розміщення магістралей з інтенсивним рухом транспорту. Число стаціонарних постів залежить від кількості населення, площі населеного пункту, рельєфу місцевості, характеру та рівня розвитку промисловості (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Рекомендації щодо кількості постів

Чисельність населення, тис. чол.	до 50	50 – 100	100 – 200	200 – 500	500–1000	Більше 1000
Кількість постів	1	2	2...3	3...5	5...10	10...20

На стаціонарних постах встановлено чотири програми спостереження за рівнем забруднення повітря: повна, неповна, скорочена та добова.

Спостереження за *повною програмою* виконують щоденно чотири рази на добу – о 1-й, 7-й, 13-й та 19-й годині. Повна програма виконується для отримання оперативної інформації про рівні забруднення атмосферного повітря та даних про середньодобові концентрації основних забруднювальних речовин.

Спостереження за *неповною програмою* виконують щоденно три рази на добу – о 7-й, 13-й та 19-й годині. Неповна програма виконується для отримання оперативної інформації про разові концентрації забруднювальних речовин.

Спостереження за *скороченою програмою* за основними забруднювальними речовинами виконують щоденно два рази на добу – о 7-й та 13-й годині в районах з низьким рівнем забруднення повітря.

*Добові спостереження* виконують для отримання інформації про середньодобові концентрації інгредієнтів за неперервного відбирання проб протягом доби.

Спостереження за рівнем забруднення атмосфери виконують у всі пори року незалежно від метеорологічних умов: а саме, напрям і швидкість вітру; зовнішня температура повітря; відносна вологість; стан погоди та підстильної поверхні. За несприятливих метеорологічних умов, тобто туман чи тривалі інверсії температури, спостереження за якістю повітря виконують кожні три години.

**Маршрутні спостереження** виконують у випадках, коли стаціонарних постів в місті недостатньо або необхідно більш детально вивчити будь-який район міста. Маршрутним постам присвоюється порядковий номер і їх місцеположення наноситься на план міста. Спостереження на маршрутних постах виконують за допомогою пересувної лабораторії, яка за зміну відбирає 8–10 проб повітря двічі в 4–5 пунктах. Оскільки відбір проб виконують неодноразово, то порядок об'їзду маршрутів змінюється так, щоб проби на кожному маршруті відбиралися в різні години доби.

**Підфакельні спостереження** проводять з метою отримання даних про поширення шкідливих речовин від окремих джерел викидів залежно

від метеорологічних умов та оцінки впливу цих джерел на забруднення атмосфери. Спостереження під факелом виконують за типовими інгредієнтами для певних підприємств. Відбирання проб повітря виконують послідовно за напрямком вітру на різних відстанях від джерела викидів: 0,2...0,5; 1...2; 3; 4; 6; 8; 10; 15 та 20 км. Для контролю вимірювань відбирають проби повітря також з підвітряної сторони на деякій відстані від джерела. Найбільш важливим є вимірювання на відстані, що дорівнює 10...40 висотам труб. В цій зоні, де очікується максимальна концентрація домішок, відбирають 50...60 проб повітря для кожного інгредієнта. Напрямок факела визначають візуально за характером поширення диму або запаху. Відбирання проб виконують на висоті 1,5 м протягом 20...30 хвилин з інтервалом 10 хвилин між відборами.

Під час спорудження промислових об'єктів програмою оцінювання рівня забруднення повітря передбачаються спостереження за вмістом в атмосфері корозійно-активних домішок. Особливо це має суттєве значення у випадку будівництва на засолених ґрунтах та поблизу водних поверхонь. Причиною корозійної активності є наявність в повітрі хлоридів та діоксиду сірки. Спостереження за вмістом в атмосфері корозійно-активних домішок проводять за допомогою постів. Проби повітря відбирають один раз на добу на висоті 1,5; 10; 30; 40 м від землі протягом 90 хвилин.

Залежно від концентрації хлоридів і діоксиду сірки атмосферу за корозійною активністю класифікують на умовно чисту, промислову, морську та приморсько-промислову.

**Дослідження рівня забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту** виконується як в комплексі з вивченням забруднення, що обумовлено викидами промислових джерел, так і окремо. Оцінювання рівня забруднення атмосферного повітря на автомагістралях і прилеглий до них житловій забудові ґрунтується на натурних спостереженнях за концентрацією в викидних газах автотранспорту таких компонентів: оксиду вуглецю, вуглеводнів, оксидів азоту, акролеїну, формальдегіду, з'єднань свинцю та продуктів фотохімічних перетворень.

Програма дослідження характеру забруднення атмосферного повітря автотранспортом передбачає:

- визначення максимальної концентрації викидів, періодів їх виникнення за різних метеорологічних умов й інтенсивності руху автотранспорту;
- визначення границь зон і характеру розподілу різної шкідливості залежно від віддалення від автомагістралей;
- визначення особливостей поширення шкідливих викидів в житлових кварталах і зелених зонах, що прилягають до автомагістралей.

Пункти спостереження вибирають безпосередньо на міських вулицях і районах з інтенсивним рухом транспорту, а саме:

- на ділянках вулиць до і після світлофора, а також на інших ділянках, де автомобілі під час гальмування викидають найбільшу кількість шкідливих домішок;
- в місцях накопичення шкідливих домішок, де вони погано розсіюються внаслідок архітектурно-планувальних особливостей;
- в зонах перетину двох та більше вулиць з інтенсивним рухом транспорту.

Точки спостережень розміщують на тротуарі або середині проїзної частини дороги. На вулицях, що перетинають основну магістраль, пункти спостереження розміщують з краю тротуару і на відстані, яка дорівнює 0,5 ширини магістралі та перевищує її в 2 і 8 разів.

Інтенсивність руху на ділянках дорожніх магістралей визначають за категоріями автомобільного транспорту: легкові та вантажні автомобілі, автобуси, автомобілі та автобуси з дизельними та бензиновими двигунами; мотоцикли. Інтенсивність руху визначають щоденно протягом 2–3 тижнів в період з 5–6 години ранку до 21–23 години вечора, а на транзитних магістралях – протягом доби. Середня швидкість руху транспорту визначається за показаннями спідометра автомобіля, що рухається в потоці транспортних засобів по цій автомагістралі на ділянці довжиною 0,5...1,0 км. За результатами натурних досліджень обчислюють середнє значення інтенсивності руху автотранспорту протягом доби в кожній точці вимірювань.

Під час обстеження стану забруднення атмосфери викидами автотранспорту виконують також метеорологічні спостереження в вибраних пунктах та на метеостанції, яка розміщена за містом. Під час метеорологічних спостережень визначають різницю температури, вологість повітря й швидкість вітру на рівнях 0,5 й 1,5 м від поверхні землі.

**Для визначення впливу метеоумов на характер забруднення атмосфери необхідні дані про швидкість та напрям вітру, температуру й вологість повітря, число днів з атмосферними явищами (туман, імла, хуртовини, опади), кількість опадів та хмарність, тривалість сонячного сьйва. Установлення зв'язків виконують на основі відповідних середніх даних за місяць або за погодними умовами та протягом доби у випадку достатньої статистичної забезпеченості.**

Програмою метеорологічних спостережень передбачаються також спеціальні актинометричні вимірювання за прямою й розсіюваною радіацією. Ці дані необхідні для кількісної характеристики аерозольного стану атмосфери. Градієнтні і теплобалансові спостереження виконують для визначення величин вертикального коефіцієнта турбулентності на висоті один метр, які використовують під час розрахунків розсіювання домішок в атмосфері. Температуру й вологість повітря вимірюють аспіраційними психрометрами, які встановлені на висоті 0,5 та 1,5 м від землі. Параметри вітру заміряють за допомогою дистанційних приладів

М-47, М-49, М-63, а також ручних анемометрів МС-13. Актинометричні спостереження виконують за допомогою актинометра М-3.

Для отримання даних про детальний розподіл на території міста температури й вологості повітря, швидкості й напрямку вітру організовують мікрометеорологічні зйомки. Їх виконують кожний сезон, як правило, за стійкого стану погоди, добовими серіями (по три на сезон). Пункти на території міста розміщують якомога рівномірніше, так щоб один пункт був на площі 5...15 км<sup>2</sup>. Для визначення температури, швидкості й напрямку вітру до висоти 1,5...2,0 км виконують вертикальне зондування атмосфери з використанням радіозондів, літаків тощо.

Як чутливий індикатор для вивчення перенесення домішок від джерела забруднення використовують спостереження за опадами. Аналіз даних про хімічний склад опадів дозволяє визначити зону впливу міста або промислового району на сусідню територію, а також місця з фоновим рівнем забруднення.

Як характеристика рівня забруднення за кожним інгредієнтом є середнє значення концентрації  $C_{CP}$  за вибраний період часу та його середнє квадратичне відхилення  $\sigma_C$ , максимальнє значення концентрації  $C_M$  за вибраний період часу, а також частота виникнення в період, який розглядається, концентрацій певних границь, яку прийнято описувати повторністю вище гранично допустимої концентрації  $P$ . За основний період, за який визначають ці характеристики, приймають місячний інтервал часу. Крім місячного інтервалу, характеристики забруднення можуть визначатись за добу або декаду, а також за різних синоптичних ситуацій: ясна або похмура погода; сильний або слабкий вітер; після випадання опадів тощо.

Обробка даних, тобто отримання значень  $C_{CP}$ ,  $\sigma_C$ ,  $C_M$ ,  $P$ , виконується в окремих пунктах спостережень.

Якщо необхідні результати для окремого району, то розрахунки характеристик виконують складанням даних спостереження на всіх постах заданого району. Результати аналізу матеріалів про забруднення атмосферного повітря подають у вигляді таблиць, графіків та картосхем:

- порівняльні характеристики значень  $C_{CP}$ ,  $\sigma_C$ ,  $C_M$ ,  $P$  за окремими інгредієнтами, пунктами і для всього району за окремі місяці року й за всіма спостереженнями;
- порівняльні характеристики значень  $C_{CP}$  і  $C_M$  за погодними умовами, зокрема за окремими метеорологічними факторами й синоптичними ситуаціями;
- графіки зміни характеристик забруднення протягом доби й місяця;
- графіки зв'язку характеристик забруднення  $C_{CP}$  й  $C_M$  та метеорологічних параметрів, особливості швидкості й напрямку вітру, опадів, приземних інверсій, туманів;

- картосхеми розподілу значень  $C_{CP}$  й  $C_M$  на територію району в окремі періоди спостереження, що характерні за умовами погоди та викидами;

- таблиці характеристик забруднення на окремих пунктах за різних викидів.

Доцільно подавати на картосхемах розподіл максимальних значень концентрацій від викидів різними джерелами за напрямку вітру на житлові райони міста і за різних метеорологічних умов.

## **2.2 Методи й технічні засоби визначення шкідливих речовин в атмосферному повітрі**

У зв'язку із зростанням антропогенного впливу на атмосферу, як складового елемента біосфери, виникла проблема нормування та контролювання цього впливу з метою збереження високої якості атмосфери та спроможності її відтворення до природного стану.

**Критерії високої якості** навколишнього середовища:

- середовище дає можливості для сталого існування й розвитку історично виниклої, створеної або перетвореної людиною екосистеми;

- відсутні інші й не загрожують в майбутньому постійно або тимчасово несприятливі наслідки для популяції, що перебуває в цій екосистемі.

Концентрація більшості атмосферних забруднювачів дуже низька, тому точне визначення її в повітрі є складною задачею. Поширеними забруднювачами атмосферного повітря є оксид вуглецю, діоксид сірки, оксид й діоксид азоту та пил. За цими компонентами ведуть регулярні спостереження на стаціонарних, маршрутних й підфакельних постах.

Метод контролю запиленості повітря вибирають залежно від стану пилу. Після осідання пилу запиленість повітря контролюють методами: ваговим, п'єзоелектричним, радіоізотопним, зарядно-контактним, оптичним та уловлюванням водою. У випадку знаходження пилу в підвішеному стані запиленість повітря контролюють індукційним, акустичним та оптичним методами.

Концентрацію шкідливих речовин в атмосферному повітрі визначають методами хімічного аналізу. Найбільш поширені методи мікроколориметрії, суть яких полягає в аспіраційному відбиранні проб атмосферного повітря, наступному аналізі відібраних проб й обробці даних. Хімічні методи реалізуються апаратурою для відбору проб повітря й апаратурою для лабораторного аналізу цих проб.

Недоліки хімічних методів: значні витрати часу на відбирання проб та їх аналіз, що призводить до запізнення в отриманні необхідної інформації про забруднення атмосферного повітря. Вони також не дозволяють виконувати безперервний аналіз забруднення.

Автоматичні газоаналізатори дозволяють вести безперервний контроль забруднення атмосфери за окремими інгредієнтами. Принцип роботи газоаналізаторів полягає в використанні таких фізико-механічних методів дії на певну речовину в потоці повітря через реакційну камеру, внаслідок яких відбуваються специфічні реакції з виділенням різних видів енергії. Енергія перетворюється в електричний сигнал, пропорційний кількості речовини, яка вимірюється.

За хімічного методу кількісний аналіз забруднювальних речовин виконують після їх концентрації, яка відбувається шляхом протягування повітря, що аналізується, через поглинальні пристрої або фільтри.

Структурну схему пристрою для відбирання проб повітря наведено на рис. 2.1.

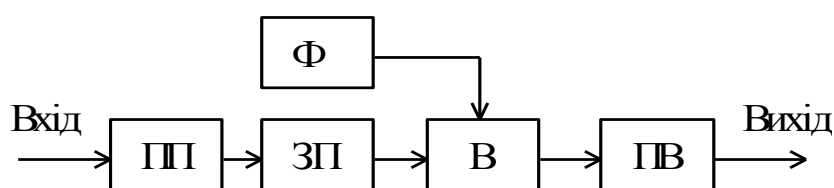


Рисунок 2.1 – Структурна схема пристрою для відбирання проб

Пристрій для відбирання проб повітря містить: поглинальний прилад (ПП), який заповнений поглинальним розчином; захисний патрон (ЗП), щоб не потрапляли бризки з ПП; фільтр (Ф); витратомір (В); побудник витрат (ПВ).

Кількісний аналіз шкідливих домішок в атмосферному повітрі проводиться після концентрування шляхом пропускання певного об'єму газової суміші через рідкий або твердий поглинач або аерозольний фільтр. Як поглинальне обладнання використовують рідинні поглинальні прилади, сорбційні трубки та фільтри.

**Рідинні прилади.** Речовини в газо- й пароподібному стані вловлюються рідинними поглинальними середовищами, до яких відносяться дистильована вода, органічні розчини або спеціальні поглинальні розчини. Має поглинатись не менше 95 % речовини, вміст якої визначається.

Найбільше поширені U-подібний прилад з пористою скляною пластиною (рис. 2.2, а) та прилад Ріхтера (рис. 2.2, б), що виготовляються з інертного матеріалу відносно речовин, які досліджуються.

U-подібний поглинальний прилад (рис. 2.2, а) виготовлено зі скляних трубок більшого 1 та меншого 2 діаметрів, на яких є мітка 3. В трубці більшого діаметра 1 розміщено фільтр 4, який виготовлено у вигляді пластини зі скла з різними за розмірами порами. Повітря за допомогою пористої пластини 4 розбивається на безліч мілких бульбашок, що забезпечує більшу поверхню дотику з поглинальним середовищем.

Відбирання проб U-подібним поглинальним приладом відбувається за об'єму протягування повітря до  $0,18 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Поглиналий прилад Ріхтера (рис. 2.2, б) виконаний як скляна посудина 1, всередині якої розміщена скляна циліндрична трубка з розширювачем 2. Відбирання проб приладом Ріхтера виконують за об'єму протягування повітря до  $0,6 \text{ м}^3/\text{с}$ .

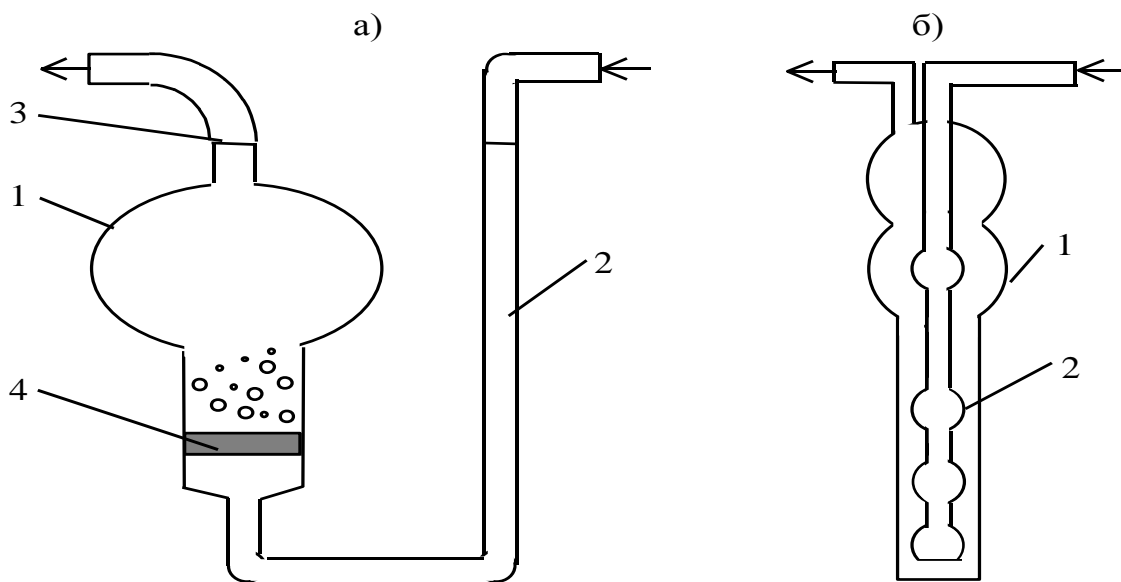


Рисунок 2.2 – Рідинні прилади: а) U-подібний; б) прилад Ріхтера

Недоліками рідинних приладів є невелика швидкість відбирання проб повітря, замерзання розчину та крихкість приладу.

**Сорбційні трубки.** Найбільш ефективним поглинальним пристроєм концентрації шкідливих речовин є сорбційні трубки (рис. 2.3), що виготовляються зі скла. Довжина сорбційної трубки 170 мм та діаметр 8...10 мм.

Сорбційні трубки містять перфоровані скляні пластини 1 та скляні гранули-носії 2, покриті невисихаючими плівками спеціального розчину – сорбенту ( $d = 1...2 \text{ мм}$ ). Об'єм прокачування повітря  $1,2 \text{ м}^3/\text{с}$ .

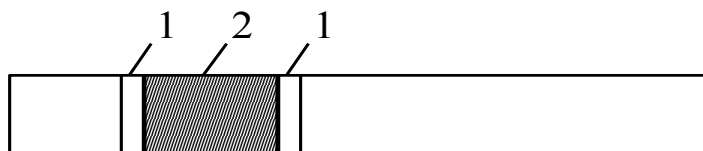


Рисунок 2.3 – Сорбційна трубка

Після відбору проб повітря, поглинальні прилади та сорбційні трубки герметично закривають. Оберігають їх від дії світла на проби  $\text{SO}_2$ ,

H<sub>2</sub>S, CS. Зберігають проби за температури, не вищої за 25 °С, а проби на SO<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>S розміщують в холодильнику.

Рідинні поглиначі й сорбційні трубки непридатні для відбирання проб аерозолів. Для уловлення токсичних речовин у вигляді високодисперсних аерозолей, що знаходяться в диму, тумані й пилу, використовують фільтрувальні матеріали: щільні паперові, мембранні скловолкнисті фільтри, ультратонкі волокнисті полімерні (тканини Петрянова) (рис. 2.4, а). Ці тканини дозволяють досягнути швидкості аспірації 6...12 м<sup>3</sup>/с.

Для відбору проб повітря використовують фільтроутримувач, в якому розміщують фільтр (рис. 2.4, б).

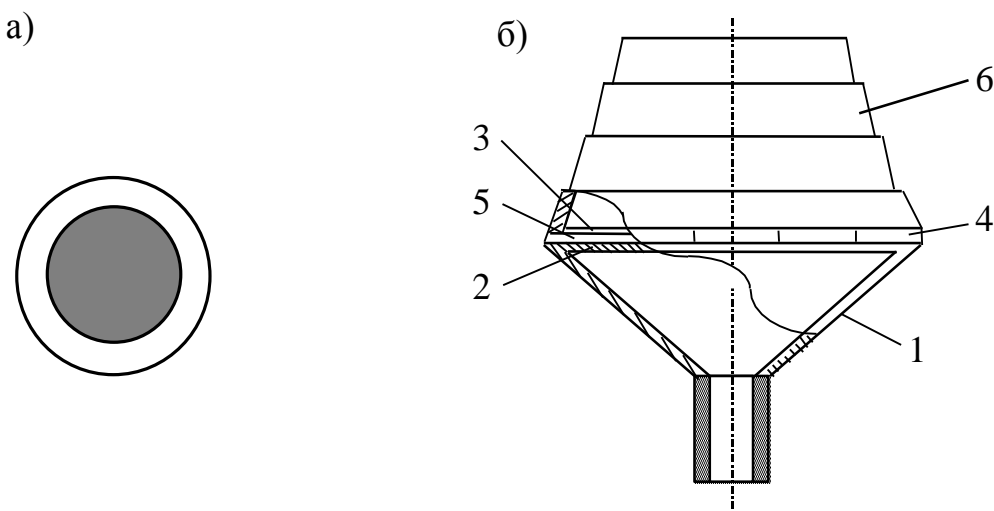


Рисунок 2.4 – Фільтр (а) та фільтроутримувач (б)

Фільтроутримувач (рис. 2.4, б) має корпус 1, що виконаний із фторопласту, алюмінію чи пластмаси та має конусоподібну форму. На корпусі 1 закріплено сітку 2, прижимне кільце 3 та накидну гайку 4. На сітці 2 розміщують фільтр 5. На фільтроутримувачі з фільтром 5 розміщують конусну насадку 6, що має чотири конуси з різними діаметрами.

Діаметр ( $d = 25; 35; 45; 55$ ) насадки залежить від швидкості аспірації й вітру. Чим більша швидкість вітру, тим менший діаметр насадки. Кількість поглинених домішок визначають як різницю маси фільтра до та після протягування повітря, що аналізується.

Точність визначення концентрації речовини залежить від похибки обліку об'єму повітря, що проходить через поглинальне приладдя. Достатню точність дозволяють отримати такі витратоміри як реометри, ротаметри та газові лічильники.

**Реометри.** Конструктивну схему реометра наведено на рис. 2.5. Вона містить U-подібну манометричну трубку 1, верхні частини якої з'єднані між собою горизонтальною манометричною трубкою 2. Всередині

горизонтальної трубки 2 вмонтовано діафрагму з каліброваним отвором 3. Рівень рідини в U-подібній трубці 1 контролюють шкалою рівня рідини 4. На вході горизонтальної манометричної трубки 2 приєднують поглинальний прилад, а на виході – побудник витрати.

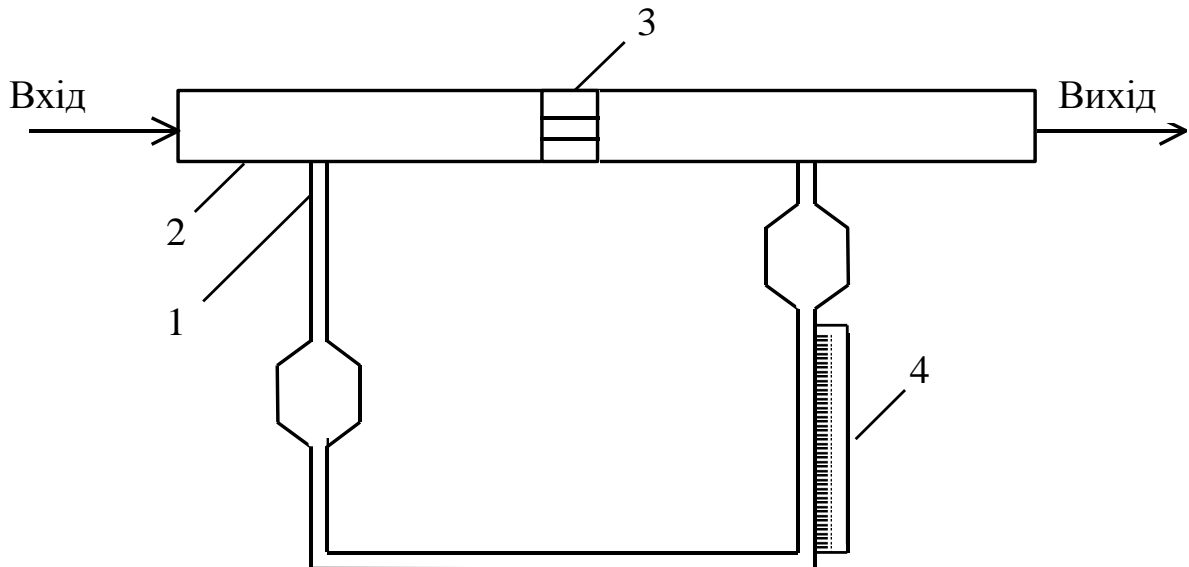


Рисунок 2.5 – Конструктивна схема реометра

За відсутності повітряного потоку рівень рідини в обох колінах манометричної трубки однаковий. Коли потік повітря протікає через горизонтальну трубку 2, то перед діафрагмою 3 утворюється зона підвищеного тиску, а за нею – зона пониженого тиску. Через це рівень рідини в лівому коліні U-подібної манометричної трубки 1 понизиться, а в правому – підніметься. Різниця рівнів визначається за допомогою шкали 4 реометра, яка градується за допомогою контрольного витратоміра.

**Ротаметри.** Використовують для визначення витрати газу за умови індивідуального градування на заданий газ. Принципову схему ротаметра наведено на рис. 2.6 і на ній подано конусну трубку 1, в якій розміщено поплавок 2 та шкалу 3.

Принцип дії ротаметра ґрунтується на сприйманні поплавком 2 динамічного тиску газу, що проходить знизу вгору по конусній трубці 1. Під час піднімання поплавок 2 прохідна щілина між найменшим діаметром поплавка й внутрішнім діаметром трубки 1 збільшується. Перепад тиску на рівні поплавка 2 зменшується. Коли перепад тиску стає таким, що дорівнює масі поплавка, яка випадає на одиницю поперечного перерізу, настає рівновага. У цьому разі кожному положенню поплавка 2 відповідає значення витрати газу, що визначають за шкалою 3.

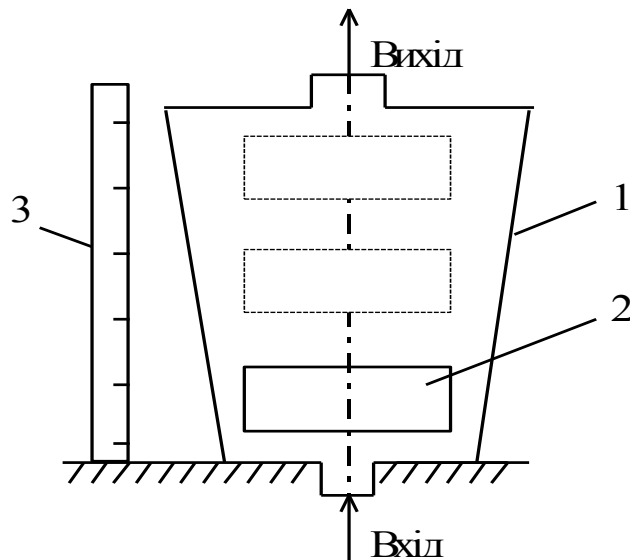


Рисунок 2.6 – Принципова схема ротаметра

**Лічильники газу.** Лічильник газовий барабанний ГСБ-400 використовується для вимірювання незначних об'ємів неагресивних газів та для градуювання ротаметрів й електроаспіраторів. Границі вимірювання витрати повітря 0,02...0,6 м<sup>2</sup>/год, а похибка ±1 %.

Як побудники витрати повітря використовуються побутові пилососи, компресори, ротаційні й вібраційні насоси. Потужність побудника витрати та розрідження, що ним утворюється, має забезпечувати необхідну швидкість аспірації повітря.

У випадку відбору проб пилу, коли необхідні великі швидкості аспірації, що перевищують 6 м<sup>3</sup>/с, використовуються побутові електропилососи. Їх центробіжні вентилятори високого тиску створюють розрідження не менше 1300 мм водяного стовпа. У разі відбирання проб повітря на газові інгредієнти, коли швидкості аспірації не перевищують 0,6 м<sup>3</sup>/с, використовуються ротаційні побудники витрати повітря – **електроаспіратори**.

Для разового або безперервного відбирання проб повітря в автоматичних газоаналізаторах й хроматографах використовуються мембранні вібраційні насоси.

**Електроаспіратори** з ротаційним побудником витрати моделей **ЕА-1А, ЕА-1 та 822** призначені для відбирання разових проб повітря на пил та газоподібні суміші для наступного аналізу.

**Повітровідбірник «Компонент»** призначений для аспіраційного відбирання проб атмосферного повітря з використанням поглинальних пристроїв. Прилад забезпечує цілодобове відбирання проб повітря циклами від 5 до 24 годин. Протягом циклу прилад забезпечує восьмиразове відбирання проб повітря по чотири компоненти одночасно. Тривалість відбирання проби від 5 до 30 хвилин. Діапазон вимірювання

витрати повітря може змінюватися відповідно до вимог методу визначення компонент, що аналізуються. Похибка вимірювання не перевищує 5 %.

Таблиця 2.2 – Характеристика електроаспіраторів

Параметри	822	ЕА-1	ЕА-2
1 Відбір проб повітря, м <sup>3</sup> /с 1-й та 2-й канали, 3-й та 4-й канали	0,006...0,12 0,06...1,2	0,015...0,06 0,06...0,24	9... 15
2 Сумарні витрати повітря, м <sup>3</sup> /с	0,48	0,48	15
3 Похибка, %	10	10	6

**Електроаспіратор ЕА-2с** призначений для аспіраційного відбирання проб пилу з атмосферного повітря з метою наступного графометричного й фізико-хімічного аналізів. Прилад одноканальний, як побудник витрати повітря використовується вихровий вентилятор. Максимальні витрати – 7,5 м<sup>3</sup>/с, а мінімальні – 4,5 м<sup>3</sup>/с. Похибка вимірювання об'єму повітря  $\pm 5$  %. Електроаспіратор може працювати в ручному й автоматичному режимах.

**Електроаспіратор ЕА-3** призначений для безперервного й циклічного відбору добової проби пилу з атмосферного повітря аспіраційним методом з метою наступного фізико-хімічного аналізу важких металів та канцерогенних речовин. Конструкція містить фільтроутримувач з захисним ковпачком, аспіраційний блок з витратоміром й побудником витрати повітря. Витрати повітря 0,0015...0,01 м<sup>3</sup>/с з похибкою вимірювання  $\pm 5$  %.

### 2.3 Методи й засоби лабораторного та автоматичного контролю стану атмосферного повітря

#### Спектрофотометричний метод лабораторного аналізу проб повітря

Відібрані за допомогою поглинальних приладів й електроаспіраторів проби атмосферного повітря аналізуються фізико-хімічними методами, що дозволяють визначити вміст речовин з невеликою концентрацією.

**Спектрофотометричний метод лабораторного аналізу проб повітря** ґрунтується на спроможності забарвлених розчинів поглинати світло від ультрафіолетового до інфрачервоного діапазону. Поглинання залежить від властивості речовини та її концентрації. За цього методу аналізу компонент, що досліджується, переводиться в сполучення, яке поглинає світло, а потім вимірюється кількість цього продукту за світловим потоком, який пройшов через розчин.

Спектрофотометричні вимірювання виконують за допомогою спектрофотометрів й фотоелектрокалориметрів. Дія цих приладів ґрунтується на зміні інтенсивності світлового потоку під час проходження через розчин залежно від товщини шару, міри забарвлення та концентрації. Мірою концентрації є оптична щільність  $D$  або коефіцієнт світлопропускання розчину  $\tau$ , що визначається за формулою

$$\tau = 100 \Phi / \Phi_0 \% , \quad (2.1)$$

де  $\Phi$  – повний світловий потік;

$\Phi_0$  – пропущений через середовище світловий потік.

Для визначення концентрації речовини на фотокалориметрі порівнюють оптичні щільності розчину, що досліджується, та розчини стандартного ряду. З цією метою спочатку за допомогою приладу вимірюють оптичні щільності серії розчинів, які мають різний заданий вміст речовини, що визначається. Будують на міліметровому папері залежність оптичної щільності від концентрації речовини в розчині, тобто градуйований графік приладу. Вимірюють оптичну щільність  $i$  за градуйованим графіком знаходять вміст речовини в розчині.

Фотокалориметри бувають одноканальні та двоканальні. В одноканальному приладі вимірювальний світловий потік  $\Phi$  та компенсаційний світловий потік  $\Phi_0$  надходять на фотоперетворювач по чергово по одному оптичному каналу. В двоканальному приладі світлові потоки опромінюють свої фотоперетворювачі одноразово.

**Калориметр фотоелектричний компенсаційний КФК** призначений для вимірювання в окремих діапазонах довжин хвиль 315–630 нм, що виділяються світлофільтрами, коефіцієнтів пропускання й оптичної щільності рідких розчинів. Цей прилад забезпечує вимірювання коефіцієнта пропускання від 100 % до 5 %, що відповідає оптичній щільності від 0 до 1,3 з абсолютною похибкою до 7 %.

В основі роботи приладу лежить компенсаційний метод вимірювання, що реалізується його функціональною схемою (рис. 2.7).

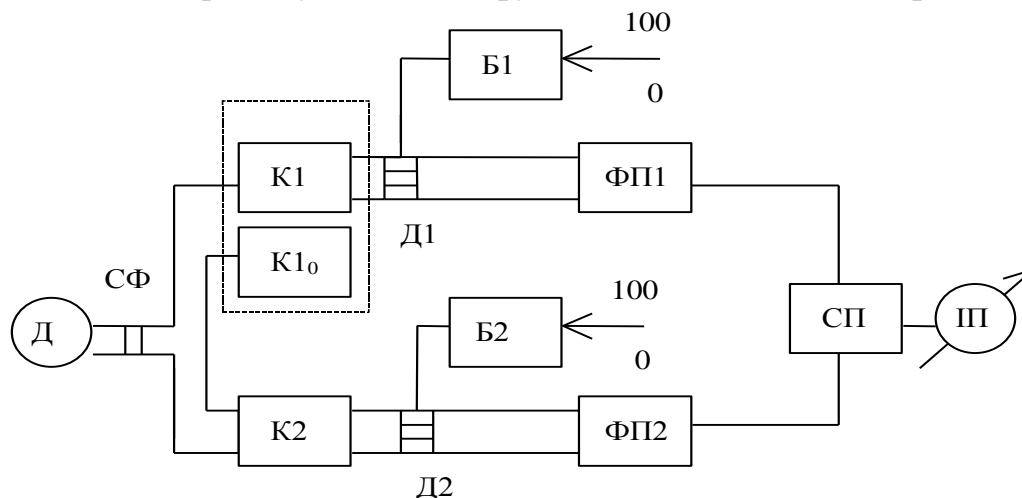


Рисунок 2.7 – Функціональна схема калориметра фотоелектричного компенсаційного КФК

Джерело світла (ДС) формує вимірювальний світловий потік  $\Phi$  та компенсаційний  $\Phi_0$ , що через світлофільтр (СФ) надходять в кювети з розчином в вимірювальному каналі (К1) та компенсаційному каналі (К2), які заповнені дистильованою водою. Для корегування результатів вимірювання приладу передбачено заміну кювета К1 на кювет К1<sub>0</sub>, що заповнюється нульовим розчином. Через розсувні діафрагми (Д1 та Д2) вимірювальний ( $\Phi$ ) та компенсаційний ( $\Phi_0$ ) світлові потоки надходять на фотоперетворювачі в вимірювальному (ФП1) та компенсаційному (ФП2) каналах. З фотоперетворювачів ФП1 та ФП2 електричні сигнали через схему порівняння (СП) надходять на індикаторний прилад (ІП). Барабани Б1 та Б2 призначені для регулювання розмірів діафрагм Д1 та Д2.

**Калориметр фотоелектричний компенсаційний КФК-2** призначений для вимірювання в окремих діапазонах довжин хвиль 315–980 нм, що виділяються світлофільтрами, коефіцієнтів пропускання й оптичної щільності рідинних розчинів. Прилад забезпечує вимірювання коефіцієнтів світлопропускання від 100 % до 5 %, що відповідає оптичній щільності від 0 до 1,3 з абсолютною похибкою  $\pm 1$  %.

Принцип вимірювання коефіцієнта пропускання полягає в тому, що на фотоприймачі по чергові направляються повний світловий потік  $\Phi_0$  та потік, що пройшов через досліджуване середовище  $\Phi$ . Цей принцип реалізується його функціональною схемою (рис. 2.8):

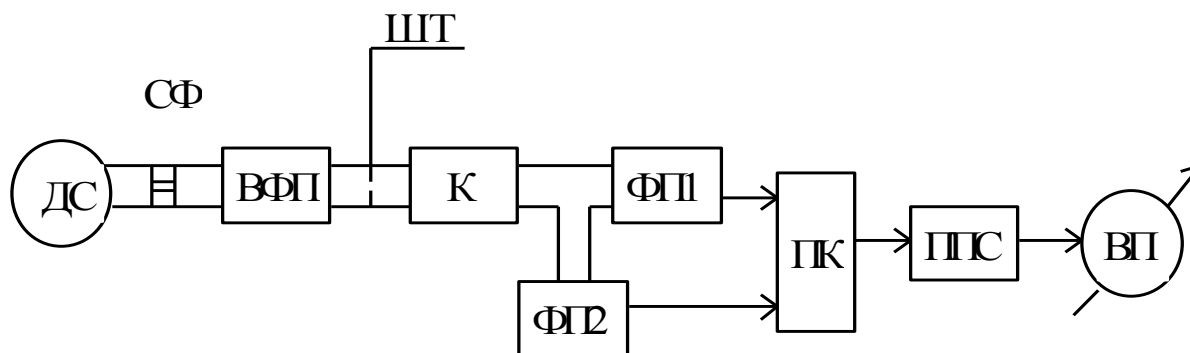


Рисунок 2.8 – Функціональна схема калориметра фотоелектричного компенсаційного КФК-2

Світло від джерела (ДС) через світлофільтри (СФ), що перетворено вузлом формування світлового променя (ВФП), через кюветне відділення (К) надходить на перетворювач ФП1, що працює в межах спектра 315–540 нм, та фотоперетворювач (ФП2), що працює в межах спектра 590–980 нм. За допомогою комутувального пристрою (ПК) фотоперетворювачі ФП1 та ФП2 вибірково підключаються до входу підсилювача постійного струму (ППС). Підсилений сигнал, пропорційний світлопропусканню (оптичній щільності) розчину, вимірюється приладом (ВП). Для регулювання нуля приладу передбачено шторку перекриття світлового потоку (ШТ).

**Спектрофотометр СФ-26** призначений для вимірювання в двох діапазонах коефіцієнтів пропускання рідких й твердих речовин в межах спектра 186...1100 нм. Для роботи спектрометра в межах спектра 186...650 нм використовують сурмацезієвий фотоелемент з вікном із кварцового скла та дейтерійову лампу як джерело світла. Для роботи спектрометра в діапазоні спектра 600...1100 нм використовують киснево-цезійовий фотоелемент та звичайну лампу розжарювання як джерело світла.

Вимірювання виконується методом електричної автокомпенсації, що реалізується його функціональною схемою.

**Електрохімічні методи** лабораторного хімічного аналізу проб повітря прості в реалізації, але їх недоліком є значні затрати часу на відбирання проб й проведення аналізу. Через це інформація про забруднення повітряного басейну надходить з запізненням, що може призвести до небажаних наслідків.

З метою оперативного визначення концентрації забруднювальних речовин й управління процесом очищення повітря використовують автоматичні засоби спостережень шляхом включення апаратури автоматичного газового аналізу в систему контролю й управління технологічними процесами. В основі роботи газоаналізаторів для визначення концентрації оксиду вуглецю, хлору, діоксиду сірки, оксидів азоту, озону, вуглеводнів, що містяться в викидах всіх підприємств, лежать фізико-хімічні методи, що реалізуються різною за конструктивними особливостями апаратурою.

Робота електрохімічних газоаналізаторів ґрунтується на таких методах аналізу: кулоно-полярографічний, потенціостатичної амперметрії.

Обидва методи реалізуються за допомогою електрохімічних комірок. В цих комірках відбувається електрохімічна реакція, якщо через них прокачувати газову суміш, що містить речовини, які визначаються газоаналізатором. Енергія хімічної реакції перетворюється безпосередньо в електричну. Сигнал з електрохімічної комірки, що пропорціональний кількості досліджуваного компонента в повітрі, вимірюється електронною схемою приладу «Атмосфера 1», «Атмосфера 11», «Палладій 2М».

Основним елементом приладів «Атмосфера 1» та «Атмосфера 11» є електрохімічна комірка, яка працює в режимі гальванічного елемента. Електрохімічна комірка має вимірювальний та порівняльний електроди, розміщені відповідно в вимірювальній та порівняльній камерах. Обидві камери заповнені відповідними реактивами, що забезпечують електрохімічну реакцію під час визначення концентрації компонента, що досліджується в газовій суміші. В процесі прокачування через вимірювальну камеру аналізованої суміші за наявності досліджуваного компонента відбувається процес перетворення енергії хімічної реакції в електричну. Результат – виникає струм, сила якого пропорціональна кількості досліджуваного компонента. За відсутності досліджуваного компонента різниці потенціалу на вимірювальному та порівняльному електродах немає.

**Функціональна схема газоаналізатора «Палладій 2М»** для визначення концентрації оксиду вуглецю, робота електрохімічної комірки якого ґрунтується на методі потенціальної амперометрії, наведена на рис. 2.9.

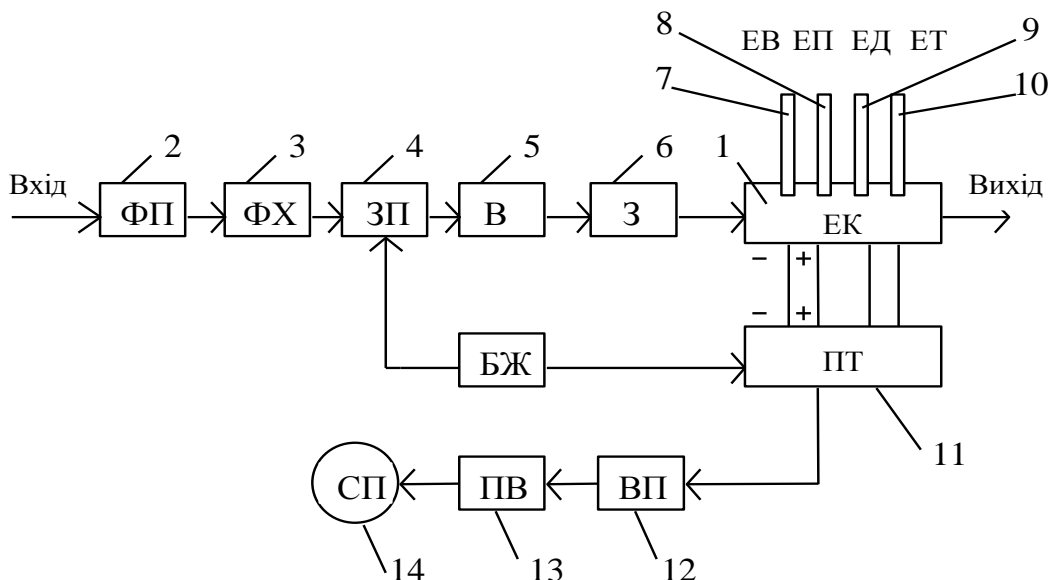


Рисунок 2.9 – Функціональна схема газоаналізатора «Палладій 2М»

**Люмінесцентний метод** ґрунтується на переході випромінюючих світло атомів, молекул та іонів в збуджений стан внаслідок поглинання енергії, що приноситься збуджувальними джерелами енергії. За повернення їх в нормальний або менше збуджений стан відбувається виділення світла. Люмінесценція, що припиняється одразу після закінчення дії збуджувача свічення, називається флуоресценцією. Люмінесценція, що зберігається тривалий час після припинення дії збуджувача свічення, називається фосфоресценцією.

Люмінесценція під дією світла називається фотолюмінесценцією, під дією хімічних перетворень – хемілюмінесценцією, під дією рентгенівських променів – рентгенофлуоресценцією, під дією електричного струму й поля – електролюмінесценцією.

Для визначення концентрації оксидів азоту, вуглецю, сірки, озону, аміаку використовують газоаналізатори, що працюють на принципі хемілюмінесценції.

Під час визначенні концентрації оксиду вуглецю методом хемілюмінесценції проходить реакція



де  $h$  – стала Планка;

$\nu$  – частота світла, що випромінюється.

Хемілюмінесцентне випромінювання спостерігається в видимій частині світла за довжини хвилі  $\lambda = 400$  нм. Границя визначення  $\text{CO}$   $0,5 \text{ мг/м}^3$ .

Для визначення концентрації шкідливих домішок, що забруднюють атмосферне повітря, використовують газоаналізатори шестисотої серії. Ці газоаналізатори виконані як блочно-модульні, що мають в своєму складі блок аналізу, електронний блок, блок побудника витрати, блок автоматичного управління та реєстратор, з'єднані між собою газовими й електричними мережами.

Суть **полум'яно-іонізаційного методу** полягає в тому, що органічні речовини, які розміщують в полум'ї водню, викликають утворення іонів. Під час переміщення цих іонів в електричному полі між електродами виникає струм, величина якого пропорційна концентрації органічних речовин.

Для стаціонарних спостережень за станом атмосферного повітря в містах й зонах розміщення промислових об'єктів використовують комплексні лабораторії «Пост-1», «Пост-2» та «Пост-3», пересувну лабораторію «Атмосфера-II» й автоматичну станцію контролю забруднення атмосфери АСКЗА-Г.

**Лабораторія «Пост-1»** – укомплектований обладнанням й приладами павільйон розмірами  $2175 \times 2175 \times 2780$  мм. Вимірювальний комплекс має системи відбирання проб повітря на газові інгредієнти, пил, сажу та їх інструментального аналізу, а також вимірювання метеорологічних параметрів.

Система відбирання проб повітря на газові домішки (рис. 2.10) містить: повітрязабірник 1, розподільчу гребінку 2, поглинальні прилади 3, захисні патрони 4 й два електроаспіратори 5. Під дією електроаспіраторів 5 повітря всмоктується в повітрязабірник 1, проходить через розподільчу гребінку 2, поглинальні прилади 3, захисні фільтри 4, ротаметри й через аспіратор викидається на вулицю. Повітря нагрівається елементом 6, який керується терморегулятором 7.

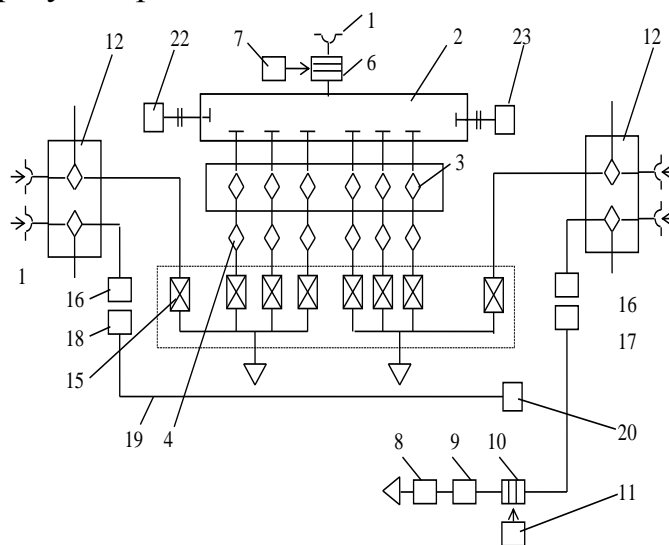


Рисунок 2.10 – Функціональна схема лабораторії «Пост-1»

Система відбирання проб повітря на пил містить побудник витрати 8, ротаметр 9, камеру підігріву 10 з терморегулятором 11 та блок відбирання проб 12.

Система відбирання проб повітря містить сажовий патрон 21, що є складовою частиною блока відбирання проб 12. Патрон 21 з аспіратором 5 з'єднується за допомогою резинової трубки.

Система інструментального аналізу для визначення концентрації оксиду вуглецю містить газоаналізатори «Паладій-2М» та МК-3. Газоаналізатори 22 та 23 з'єднані з розподільчою гребінкою 2.

Система вимірювання метеорологічних параметрів передбачає спостереження за швидкістю й напрямом вітру, температурою й відносною вологістю повітря. Контроль за роботою датчиків температури й вологості повітря виконують за допомогою аспіраційного психрометра. Атмосферний тиск вимірюють барометром-анероїдом. Датчик параметрів вітру установлений на мачті, що кріпиться до павільйону.

Система електропостачання, опалення й освітлення від мережі змінного струму. В середині павільйону обладнано робоче місце для спостерігача.

**Пересувна лабораторія «Атмосфера-II»** призначена для виконання спостережень за рівнем забруднення атмосферного повітря й дозволяє робити одноразовий відбір чотирьох-шести проб. Проби повітря відбираються на газові інгредієнти, пил, сажу, інструментальний аналіз діоксиду сірки, сірководню, озону й хлору. Визначають також метеорологічні елементи й параметри, які необхідно враховувати під час спостережень за рівнем забруднення атмосфери.

За функціональним призначенням прилади й обладнання поділяються на такі експлуатаційні системи: відбирання проб повітря на газові домішки; відбирання проб на пил; відбирання проб на сажу; інструментальний аналіз; вимірювання метеорологічних параметрів; електропостачання; опалення й освітлення.

**Автоматична станція контролю забруднення атмосфери АСКЗА-Г** призначена для автоматичного контролю й спостереження за станом атмосферного повітря міст та великих промислових підприємств й центрів. Станція забезпечує в автоматичному режимі збирання, перетворення, обробку й реєстрацію значень концентрації дев'яти шкідливих домішок в атмосфері: оксиду вуглецю, діоксиду сірки, озону, оксиду азоту, діоксиду азоту, суми оксидів азоту, метану, суми вуглеводнів, суми вуглеводнів без метану. Вимірюються також чотири метеопараметри – швидкість й напрям вітру, температура повітря й температура точки роси.

Конструктивно станція АСКЗА-Г виконана в вигляді павільйону з зовнішніми розмірами 4700×2300×3100 мм. Зверху павільйону змонтовано пристрої для забору проб повітря, мачти з метеорологічними датчиками та витяжну вентиляцію.

Станція АСКЗА-Г містить систему електропостачання з розподільною та керувальною апаратурою, пристрої для опалення й витяжної вентиляції, пристрої для забирання й викидання повітря, що аналізується, пристрої для збирання й переробки інформації та апаратуру для передавання даних.

Спостереження за станом атмосферного повітря виконує газовимірювальна автоматична багатоканальна система й комплект метеодатчиків. В газовимірювальну автоматичну багатоканальну систему входять автономні автоматичні газоаналізатори для вимірювання:

- оксиду вуглецю CO - ГИАМ-1;
- діоксиду сірки SO<sub>2</sub> - 667 ФФ-02;
- суми вуглеводнів, метану, суми вуглеводнів без метану ( $\Sigma$ СН, СН<sub>4</sub>,  $\Sigma$ СН-СН<sub>4</sub>) - 623 ИН-02;
- концентрації озону O<sub>3</sub> - 652 ХЛ-01;
- концентрації оксиду, діоксиду, суми оксидів азоту (NO, NO<sub>2</sub>,  $\Sigma$ (NO+N O<sub>2</sub>)) - 645 ХЛ-01.

Газоаналізатори, що входять в систему, можуть експлуатуватися в трьох режимах: ручному, автоматичному автономному та автоматичному дистанційному.

## **2.4 Прогнозування в системі моніторингу атмосферного повітря**

### **2.4.1 Моделювання та оцінювання якості повітряного басейну**

Поряд з контролем якості повітряного басейну суттєве значення має моделювання його стану з метою прогнозування та управління в системі екологічного моніторингу. З цією метою використовуються фізичні й математичні методи екологічного моделювання.

**Фізичне моделювання** – це коли природне явище, яке вивчається, відтворюється в певному масштабі зі збереженням його фізичної суті.

**Математичне моделювання** – спосіб дослідження природних явищ шляхом вивчення процесів, що мають різний фізичний зміст, але описуються однаковими масштабними співвідношеннями.

Математична модель складається на основі формалізованої схеми явища, що досліджується. Екологічна система, що моделюється математичними методами, містить такі ознаки:

- наявність значної кількості взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів;
- взаємодія з зовнішнім середовищем;
- можливість розкладу системи на підсистеми;
- багатфакторність мети та завдань;
- можливість керування інформаційними потоками в системі.

Умовно моделі екологічних систем діляться на три типи.

**Перший тип моделі** базується на фундаментальних законах світу (закони збереження енергії, маси, кількості руху, трансформації). За такої моделі відбираються найбільш суттєві закони для конкретного об'єкта та записуються в формалізованому вигляді, розв'язуються записані рівняння та виконується інтерпретація отриманих результатів.

Прикладом математичної моделі першого типу є диференціальне рівняння, що описує турбулентну дифузію домішок в атмосфері та водному середовищі:

$$\frac{dC}{dt} = K_x \frac{d^2C}{dx^2} - V \frac{dC}{dx} - KC + F(x,t), \quad (2.3)$$

де  $C$  – концентрація домішок в об'ємі середовища;

$K_x$  – коефіцієнт одновимірної поздовжньої дифузії;

$V$  – середня швидкість потоку в середовищі;

$K$  – коефіцієнт, що характеризує самоочищення середовища;

$t$  – час.

Процес дифузії шкідливих речовин в приземному шарі атмосфери у випадку температурних інверсій та зміни характеристик джерел викидів й для будь-якої місцевості можна описати математичним рівнянням:

$$C(x,y) = \frac{Q}{\pi V G_y G_z} \exp\left[\frac{-y^2}{2G_y^2}\right] \left\{ \exp\left(-\frac{H^2}{2G_z^2}\right) + \exp\left[\frac{(2L-H)^2}{2G_z^2}\right] \right\}, \quad (2.4)$$

де  $C(x,y)$  – концентрація шкідливих речовин у приземному шарі атмосфери;

$Q$  – потужність джерела викиду;

$V$  – середня швидкість вітру по висоті;

$G_y, G_z$  – поперечне і стандартне відхилення факела;

$H$  – висота джерела викиду;

$L$  – висота температурної інверсії.

Моделі першого типу мають певні недоліки, що полягають в значному спрощенні до реальної ситуації, в складності реального образу за допомогою багатопараметрової моделі та не виключають вплив випадкових факторів.

**Другий тип моделі** базується на встановленні закономірностей функціонування екологічних систем шляхом статичного вияву в них взаємозв'язків. Розробка моделі другого типу містить такі етапи: вибір методу статичного аналізу; планування, процес отримання даних про

об'єкт дослідження; компоновку даних, що характеризують екологічну систему; алгоритмування та розрахунки за допомогою комп'ютера статистичних співвідношень. Функція може бути описана одночленом, многочленом або рівнянням регресії, а також може бути функцією однієї або багатьох змінних.

Прикладом такої моделі є взаємозв'язок між концентраціями шкідливих забруднювачів атмосфери та метеорологічними умовами, що описується рівнянням регресії

$$\ln C_i = a + b_1 \ln C_{i+1} + b_2 \ln (T_3 + T_p - T) + b_3 \ln V, \quad (2.5)$$

де  $C_i$  – концентрація забруднюючих речовин;

$C_{i+1}$  – концентрація забруднюючих речовин в наступний день;

$T_3$  – задана температура повітря;

$T_p$  – розрахункова температура;

$T$  – середньодобова температура навколишнього середовища;

$V$  – швидкість вітру в цей момент;

$a$  – вільний член рівняння регресії;

$b_1, b_2, b_3$  – коефіцієнти при переміщеннях.

Між величиною радіаційного балансу, що впливає на характер поширення шкідливих викидів в приземному шарі атмосфери, та параметрами метричної інформації цифрової моделі місцевості встановлена залежність

$$R = 5487 - 79,8 \varphi - 0,29H, \quad \text{МДж/м}^2 \cdot \text{рік}, \quad (2.6)$$

де  $\varphi$  – широта місцевості, градуси;

$H$  – абсолютна висота місцевості, м.

**Третій тип моделі** – імітаційний, що базується на вивченні складної математичної моделі за допомогою експерименту на моделі та обробці експериментальних результатів дослідження.

Основні етапи створення імітаційної моделі:

- формування завдань вивчення екологічної системи та визначення вектора стану системи;
- введення системного часу, що моделює хід часу в екологічній системі, яка досліджується;
- декомпозиція об'єкта дослідження і побудова блочної конструкції імітаційної системи;
- формування законів і гіпотез функціонування екологічної системи загалом і по блоках;

- розробка програми для блокових складових;
- верифікація блоків за даними дослідження;
- об'єднання блоків на базі стандартного або спеціально розробленого математичного забезпечення;
- верифікація моделі загалом і перевірка її адекватності з врахуванням експертної оцінки спеціаліста-еколога;
- планування математичних експериментів;
- обробка й аналіз результатів чисельного експерименту.

Результати моделювання на основі інформаційних даних з інвентаризації викидів шкідливих речовин використовуються для оцінювання якості повітряного басейну під час проектування населених пунктів й мікрорайонів та реконструкції сформованих житлово-промислових комплексів. Критерієм якості повітряного басейну є неперевищення фактичних його параметрів нормативів гранично-допустимих викидів забруднювальних речовин й шкідливого впливу фізичних та біологічних факторів.

Для кожного діючого і того, що проектується, підприємства встановлюються гранично-допустимі концентрації викидів забруднювальних речовин й значення шкідливого впливу фізичних й біологічних факторів.

**Гранично-допустима концентрація (ГДК)** – це максимальна концентрація домішок в атмосфері, віднесена до певного часу усереднення, яка за періодичної дії чи протягом всього життя людини не справляє ні на неї, ні на навколишнє середовище загалом шкідливої дії, включно й віддалені наслідки.

Під час визначення гранично-допустимих викидів забруднювальних речовин враховується їх концентрація в атмосфері, обумовлена викидами від інших джерел:

$$C + C_{\phi} \leq \text{ГДК}, \quad (2.7)$$

де  $C$  – концентрація речовин в атмосферному повітрі від певного джерела, мг/м<sup>3</sup>;

$C_{\phi}$  – фонова концентрація забруднювальних речовин, мг/м<sup>3</sup>.

**Максимальна разова гранично-допустима концентрація ГДК<sub>max</sub>** – основна характеристика небезпечності шкідливої речовини, що встановлюється для попередження рефлекторних реакцій у людини (відчуття запаху, світла, зміна активності головного мозку) за короткочасної дії атмосферних домішок.

**Середньодобова гранично-допустима концентрація (ГДК<sub>сд</sub>)** характеризує загальнотоксичний, канцерогенний, мутагенний та інший вплив речовин на організм людини.

За одночасного вмісту в атмосфері декількох шкідливих речовин однонаправленої дії їх допустимі концентрації мають задовольняти нерівність

$$(C_1/\text{ГДК}_1 + C_2/\text{ГДК}_2 + \dots + C_n/\text{ГДК}_n) \leq 1, \quad (2.8)$$

де  $C_1, C_2$  та  $C_n$  – концентрації шкідливих речовин однонаправленої дії в атмосферному повітрі,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;

$\text{ГДК}_1, \text{ГДК}_2, \text{ГДК}_n$  – відповідні значення гранично-допустимих концентрацій цих речовин,  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

Значення гранично-допустимих концентрацій шкідливих речовин та аерозолів наведено в табл. 2.3 та 2.4.

Значення допустимих рівнів шуму для різних типів приміщень та територій наведено в табл. 2.5.

**Таблиця 2.3 – Гранично-допустимі концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі населених пунктів**

Речовина	Гранично-допустима концентрація, $\text{мг}/\text{м}^3$		Клас безпеки
	Максимальна разова $\text{ГДК}_{\text{max}}$	середньодобова $\text{ГДК}_{\text{сд}}$	
Азоту діоксид	0,035	0,04	2
Азоту оксид	0,6	0,06	3
Сірки діоксид	0,5	0,05	3
Сірчана кислота	0,3	0,1	2
Пил нетоксичний	0,5	0,15	3
Оксид вуглецю	3,0	1,0	4
Аміак	0,2	0,04	4
Сірковуглець	0,008	0,008	4
Хлор	0,1	0,03	4
Бензопірен	-	$1 \cdot 10^{-6}$	1
Сажа (кіпоть)	0,15	0,05	3
Формальдегід	0,035	0,012	3
Вугільна зола ТЕЦ	0,05	0,02	2

Таблиця 2.4 – Гранично-допустимі концентрації аерозолів

Назва речовини	Величина ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Клас безпеки
1 Кремнієвмісний пил, який містить 70 % та більше металевого пилу діоксиду кремнію	1	3
2 Кремнію карбід	6	4
3 Пил рослинного й тваринного походження		
а) бавовняний, бавовно-паперовий, льняний	2	4
б) мучний, дерев'яний	6	4
4 Сажі чорної промисловості	4	4
5 Силікатний та силікатовмісний пил:		
а) азбест природний та штучний	2	4
б) азбестоцемент	6	4
в) тальк, слюда-флагоніт	4	4
г) скляне й мінеральне волокно	4	4
д) цемент, апатит, глина, крейда	6	4
6 Вуглеводний пил		
а) кокс нартовий, піщаний, сланцевий	6	4
б) алмази природні та штучні	3	4

Таблиця 2.5 – Допустимі рівні звуків

Типи приміщень та територій	Допустимі рівні звуку, дБ	
	вдень	вночі
Жилі кімнати квартир, спальні, приміщення у дитячих закладах, будинках відпочинку, будинках-інтернатах	40	30
Лікарні (палати, операційні)	35	35
Поліклініки	35	-
Гуртожитки, готелі	45	35
Школи, дитячі заклади, класні приміщення	40	-
Адміністративні будинки	50	-
Їдальні, кафе, ресторани	55	-
Магазини, побутові установи	60	-
Територія житлової забудови, дитячих закладів, поліклінік	55	45
Територія майданчиків відпочинку лікарень	35	-

Допустимі рівні радіаційних параметрів, що регламентовані державними будівельними нормами з урахуванням класифікації об'єктів, наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Допустимі рівні регламентованих радіаційних параметрів

Групи будівельних об'єктів	Допустимий рівень регламентованого радіаційного параметра		
	Потужність поглиненої дози в приміщенні, мкР/год	Середньорічна еквівалентна рівноважна об'ємна активність радону-222, Бк/м <sup>3</sup>	Ефективна питома активність природних радіонуклідів, Бк/кг
1. Побудовані, реконструйовані та капітально відремонтовані об'єкти житлово-цивільного та промислового призначення під час введення їх в експлуатацію	≤ 30	≤ 50	≤ 370
2. Об'єкти житлово-цивільного та промислового або іншого призначення, які введені в експлуатацію до 01.01.1998 року	≤ 50	≤ 50	не нормується
3. Об'єкти промислового та дорожнього призначення, де виключене тривале перебування людей, та будівництво шляхів в межах населених пунктів і зон перспективної забудови	не нормується	не нормується	≤ 740

Сполучення шкідливих речовин, що мають однонаправлену сумарну дію:

- а) озон + діоксид азоту + формальдегід;
- б) сірчистий газ + діоксид азоту;
- в) сірчистий газ + аерозоль сірчаної кислоти;
- г) сірчистий газ + фтористий водень.

**Гранично-допустимий викид (ГДВ)** – максимальний викид шкідливої речовини в атмосферу (т/рік, г/с) від кожного джерела викиду, за кожним інгредієнтом з урахуванням перспективи розвитку підприємства і підсумовування шкідливої дії, фонового забруднення та кліматичних умов місцевості, який за розсіювання не перевищує в приземному шарі селітебної зони гранично-допустимої концентрації для населених місць, нормативні якості повітря для населення, тваринного й рослинного світів.

Гранично-допустимий викид для одиночного джерела викидів з круглим гирлом під час викиду нагрітої газоповітряної суміші визначається за формулою:

$$\text{ГДВ} = (\text{ГДК} - \text{С}_\Phi) \cdot \frac{\text{H}^2}{\text{A} \cdot \text{F} \cdot \text{m} \cdot \text{n} \cdot \eta} \cdot \sqrt[3]{\text{V} \Delta \text{T}}, \quad (2.9)$$

де **H** – висота джерела викиду, м;

**A** – коефіцієнт температурної стратифікації;

**F** – коефіцієнт, що враховує швидкість осідання шкідливих речовин в атмосфері;

**V** – витрати газоповітряної суміші;

**ΔT** – різниця температур газопровідної суміші та навколишнього середовища;

**m, n** – коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з гирла;

**η** – коефіцієнт, що враховує рельєф місцевості.

Перелік шкідливих речовин, що підлягають контролю, визначається на основі інформації про характер викидів і їх величині.

Пріоритетність шкідливих інгредієнтів визначають на основі параметра споживання повітря (ПВ).

Потрібний параметр споживання повітря визначають за формулою:

$$\text{ПВ}_{\text{pi}} = \text{M}_i / \text{ГДК}_i, \quad (2.10)$$

а реальний параметр споживання повітря за формулою:

$$\text{ПВ}_{\text{pi}} = \text{M}_i / \text{q}_i, \quad (2.11)$$

де **M<sub>i</sub>** – сумарна кількість викидів **i**-го інгредієнта;

**ГДК<sub>i</sub>** – гранично-допустима концентрація **i**-го інгредієнта;

**q<sub>i</sub>** – концентрація, встановлена за даними спостереження або розрахунками.

Якщо  $ПВ_{пі} > ПВ_{рі}$ , то концентрація  $i$ -го інгредієнта перевищує гранично-допустиму концентрацію і тоді потрібен контроль кількості цієї шкідливості в атмосферному повітрі.

Максимальні викиди в атмосферу можна зменшити зміною параметрів викиду, зокрема збільшенням висоти джерела викиду. Ефективним заходом для зменшення забруднення є створення санітарно-захисних зон навколо підприємств з явним перевищенням рівнів шкідливих викидів в атмосферу.

#### 2.4.2 Прогнозування забруднення атмосферного повітря

Прогнозування рівня забруднення атмосферного повітря виконують з метою оцінювання санітарної ситуації та перспективи її розвитку з врахуванням зростання промисловості та автотранспорту, що може призвести до збільшення об'ємів шкідливих викидів.

**Методи прогнозування** забруднення атмосферного повітря ґрунтуються на результатах теоретичного і експериментального вивчення закономірностей поширення домішок від їх джерел. Найбільш універсальний напрямок, що дозволяє досліджувати поширення домішок від джерел різного типу і за різних характеристик повітряного басейну, базується на розробці теорії атмосферної дифузії. Другий напрямок базується на емпірично-статистичному аналізі поширення забруднювальних речовин в атмосфері за допомогою інтерполяційних моделей гаусівського типу.

На основі закону збереження маси під час переносу речовин з врахуванням розсіювання, молекулярної та турбулентної дифузії й біохімічного самоочищення для прогнозу забруднення атмосферного повітря як вихідне з припущеннями, що процес поперечної та поздовжньої дифузії є стаціонарним і сумарне поле концентрації визначається за принципом суперпозиції, використовується рівняння

$$\frac{dC}{dt} = \text{div}[CV + (M+D)\text{grad } C] + a C_i, \quad (2.12)$$

де  $C$  – концентрація забруднювальних речовин, незмінних в часі  $t$ ;

$C_i$  – концентрація забруднювальних речовин, змінних в часі  $t$ ;

$V$  – швидкість переміщення атмосферного повітря;

$M$  – коефіцієнт молекулярної дифузії;

$D$  – коефіцієнт турбулентної дифузії;

$a$  – коефіцієнт, що враховує біохімічні процеси при самоочищенні.

Забруднення атмосферного повітря можна визначити за допомогою рівняння дифузії, яке має вигляд:

$$V_x \frac{dC}{dx} + V_y \frac{dC}{dy} + V_z \frac{dC}{dz} = D_x \frac{d^2C}{dx^2} + D_y \frac{d^2C}{dy^2} + D_z \frac{d^2C}{dz^2}, \quad (2.13)$$

де  $C$  – концентрація домішок в атмосфері;

$V_x, V_y, V_z$  – проєкції швидкості вітру на вибрані координатні осі;

$D_x, D_y, D_z$  – коефіцієнти дифузії по тих же осях.

Розв'язання рівняння дифузії (2.13) зводиться до розв'язання інтегральних рівнянь:

$$\iint_{S_x} [C''(x) - V_x / D_x \cdot C'(x) + K_x^2 C(x)] dx^2 = 0, \quad (2.14)$$

$$\iint_{S_y} [C''(y) - V_y / D_y \cdot C'(y) + K_y^2 C(y)] dy^2 = 0, \quad (2.15)$$

$$\iint_{S_z} [C''(z) - V_z / D_z \cdot C'(z) + K_z^2 C(z)] dz^2 = 0, \quad (2.16)$$

де  $K_x, K_y, K_z$  – змінні параметри, що визначаються за результатами експериментальних спостережень в конкретних умовах.

Процес надходження радіонуклідів радону-222 в повітря приміщень внаслідок ексхаляції через захисні конструкції будівель за радіоактивного розпаду радію-226 описується рівнянням:

$$C_0(t) = \left[ \frac{\sum q_i S_i}{W(\lambda_0 + \lambda_v)} + \frac{C_0^a \lambda_v}{(\lambda_0 + \lambda_v)} \right] \{1 - \exp[-(\lambda_0 + \lambda_v)t]\} + C_0(O) \exp[-(\lambda_0 + \lambda_v)t], \quad (2.17)$$

де  $q_i$  – швидкість ексхаляції радону через захисні конструкції будівлі, що мають площу  $S_i$ ;

$W$  – об'єм приміщення;

$\lambda_0$  – стала розпаду радону;

$\lambda_v$  – кратність повітрообміну в приміщенні;

$C_0(O)$  – об'ємна активність радону в приміщенні за  $t=0$ ;

$C_0^a$  – об'ємна активність радону в атмосферному повітрі.

Октовні рівні тиску в точці на прилеглий території від джерела шуму визначаються за формулою:

$$L = L_d - \Delta L_d - 20 \lg d - \beta d / 1000 + \delta - 8 \quad \text{дБ}, \quad (2.18)$$

де  $L_d$  – октовні рівні звукової потужності джерела шуму;

$\Delta L_d$  – сумарне зниження рівнів звукової потужності на шляху поширення шуму  $d$ ;

$\beta$  – коефіцієнт, що враховує затухання звуку в атмосфері;

$\delta$  – поправка, що враховує розташування розрахункової точки відносно осі випромінюваного шуму елемента установки.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Охарактеризуйте мету обстеження стану забруднення атмосферного повітря.
2. Назвіть основні етапи комплексного обстеження
3. Дайте означення термінів: пост, стаціонарний пост.
4. Програма дослідження характеру забруднення атмосферного повітря автотранспортом.
5. Які види метеоумов впливають на забруднення атмосфери? Наведіть приклади.
6. Прилади, котрими проводять метеорологічні спостереження.
7. Обробка та аналіз матеріалів спостережень за забрудненням атмосфери.
8. Наведіть критерії високої якості навколишнього середовища.
9. Наведіть структурну схему пристрою для відбирання проб повітря.
10. Які існують методи вимірювання шкідливих речовин в атмосфері?
11. Прилад Ріхтера. Особливості роботи.
12. Що таке фільтри й фільтроутримувачі?
13. Характерні особливості витратомірів повітря та їх призначення.
14. Принцип роботи газового лічильника.
15. Що таке електроаспіратори?
16. Види електроаспіраторів.
17. Поясніть фізичні основи спектрофотометричного методу аналізу.
18. Функціональна схема та принцип дії калориметрів фотоелектричних компенсаційних КФК та КФК-2.
19. Призначення та конструктивні особливості спектрофотометра СФ-26.
20. Поясніть фізичні основи електрохімічного методу аналізу.
21. Назвіть основні елементи та поясніть принцип дії електрохімічної комірки.
22. Функціональна схема газоаналізатора «Палладій-2М».
23. Фізична суть інфрачервоного методу аналізування повітря та прилади для його реалізації.
24. Фізична суть люмінесцентного методу аналізування повітря та прилади для його реалізації.
25. Особливості полум'яно-іонізаційного методу аналізування повітря.
26. Призначення, обладнання та функціональна схема лабораторії «Пост-І».
27. Призначення, обладнання та функціональна схема пересувної лабораторії «Атмосфера-П».
28. Призначення та обладнання автоматичної станції контролю забруднення атмосфери.
29. Методи моделювання якості повітряного басейну.
30. Нормування й контроль за забрудненням атмосферного повітря.
31. Прогнозування рівнів забруднення атмосферного повітря.

### 3 МОНІТОРИНГ ГІДРОСФЕРИ

#### 3.1 Характеристика водних об'єктів, водні ресурси та їх використання

**Гідросфера** – це сукупність води, зосереджена у Світовому океані, на поверхні суші, у підземних водоносних горизонтах, у снігах і льодовиках, атмосфері та живих організмах. Всі природні води взаємопов'язані між собою кругообігом води в природі.

**Води Світового океану** вкривають 70,8 % поверхні планети, утворюючи практично безперервну водну поверхню. Цю поверхню поділяють на Тихий, Атлантичний, Індійський і Північний Льодовитий океани.

В прибережних частинах океану можна виділити: моря, затоки, протоки та ін.

**Морями** називають відокремлені частини океанів, що характеризуються специфічними гідрологічними і кліматичними особливостями.

За розташуванням моря виділяють зовнішні, серединні та внутрішні. Зовнішні моря умовно відокремлені від океану витягнутими ланцюгами островів або значними півостровами. Серединні моря розміщені між двома материками. Внутрішні моря розташовані в глибині материків.

**Поверхневі води суші** утворюють поверхневий стік, який поділяють на схиловий та русловий.

Русловий стік часто іменують річковим стоком. Схиловий стік виникає внаслідок стікання дощової або талої води по поверхні літосфери у вигляді міриад струмочків.

Русловий стік утворюється у разі злиття струмків схилового стоку і підсилюється за рахунок виходів на поверхню підземних вод. Загальний об'єм стоку води із суші у Світовий океан оцінюється в 41...47 тис. км<sup>3</sup> за рік.

Повний річковий стік становить 38,8 тис. км<sup>3</sup>, а його поверхнева складова досягає 27 тис. км<sup>3</sup> за рік. Поверхневий стік є нестійким, тимчасовим, паводковим та часто катастрофічним (рис. 3.1). Він на планеті розподілений вкрай нерівномірно, включно й безстічні території.

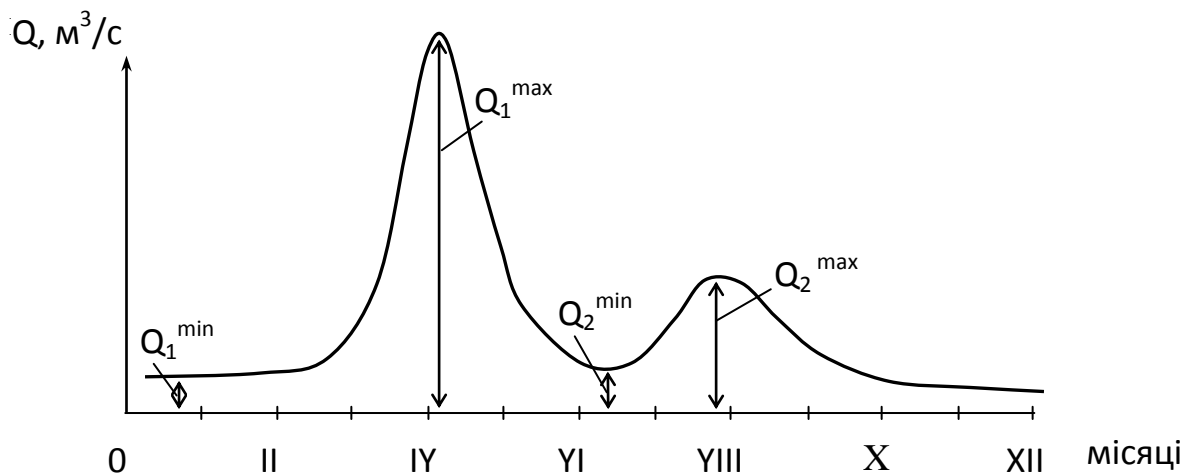


Рисунок 3.1 – Гідрограф річкового стоку:

$Q_1^{\min}$  та  $Q_2^{\min}$  – зимові та літні меженні витрати;

$Q_1^{\max}$  та  $Q_2^{\max}$  – весняні та літні паводкові витрати

**Річка** – це природний водотік, що протікає по руслу постійно або з перервами в період сухих сезонів. Кожна річка характеризується довжиною, шириною й глибиною русла, його спадами, площею й характером водозбору, швидкістю течії, витратами води, твердим й хімічним стоком. Місце, де починається річка, називають виток. Витоком можуть бути джерела, озера, болота, льодовики та злиття окремих струмків або річок. Місце впадання річки в море, озеро або іншу річку називають гирлом.

Річку, що впадає в іншу, називають притокою, а річка, в яку вона впадає іменують головною рікою. Головна річка з усіма її притоками утворює річкову систему (рис. 3.2).

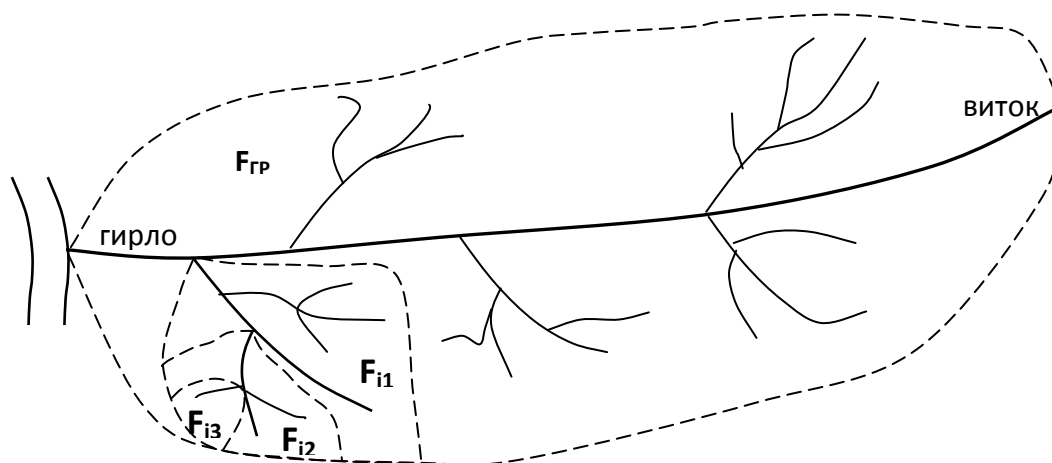


Рисунок 3.2 – Річкова система:  $F_{ГР}$  – площа водозбору головної ріки;

$F_{i1}$  – площа водозбору притоки першого порядку;

$F_{i2}$ ,  $F_{i3}$  – площі приток другого, третього і т. д. порядку

Площа, з якої вода збирається у притоки, звідки вона потрапляє в головну річку, називається водозбором або басейном ріки. Річкові басейни відокремлюються один від одного вододілами, якими є підвищення в рельєфі. Водозбір характеризується лісистістю, заболоченістю, висотою, ступенем господарської діяльності. За розмірами площі водозбору та витратами річки поділяють на великі, середні та малі. Великі річки мають площу водозбору більше 50 000 км<sup>2</sup> та витрати води більше 100 м<sup>3</sup>/с. До середніх річок належать річки з площею водозбору 2 000... 50 000 км<sup>2</sup> та з витратами води 5...100 м<sup>3</sup>/с.

**Гідрографічна мережа** – це сукупність річок, струмків, каналів, природних й штучних водойм на певній території. Вона характеризується густотою – відношенням загальної довжини всіх річок та їхніх приток, що протікають на певній території, до площі цієї території. В Україні, за середньої густоти річкової мережі 0,24 км/км<sup>2</sup>, у Карпатах вона становить понад 1,0; на Поліссі – 0,20; у Степовому Криму – 0,10 км/км<sup>2</sup>, а в нижній течії Дніпра спадає до нуля.

Живлення річок відбувається поверхневими і підземними водами, що надходять з її водозбору. Розрізняють залежно від переважного значення чотири основних типи живлення річок: дощове, снігове, льодовикове та підземне. Для основних річок України характерне змішане живлення. Залежно від переважаючого типу живлення формується гідрологічний режим річки: літня та зимова межень, весняна повінь та паводки. Для річок України також характерним є льодостав – суцільний крижаний покрив річки та весняний льодохід.

Річкові потоки ведуть значну руйнівну ерозійну роботу та транспортують частини зруйнованих порід в гирло. У цьому випадку вони утворюють конуси виносу, що формують дельту ріки. Розрізняють бокову і глибинну ерозії. Для бокової ерозії характерне підмивання берегів, яке відбувається внаслідок меандрування русла ріки. Глибинна ерозія призводить до врізання русла водотоку. Твердим стоком називають весь твердий матеріал, що переноситься річками. Твердий стік поділяють на завислі речовини та придонний стік. Кількість завислих речовин визначає мутність річки. Величина твердого стоку залежить від швидкості течії річки. В горах поверхневий змив становить понад 2500 т/км<sup>2</sup>, на височинах – 20...100 т/км<sup>2</sup>, а у межах низовинних рівнин – менше 5 т/км<sup>2</sup>.

Поверхневі води внаслідок руху по схилах водозборів розчиняють різноманітні сполуки, утворюючи природні розчини.

**Хімічний стік річок** – це кількість хімічних елементів, що надходить в річку під час їх розчинення на водозборах та з атмосферними опадами. Так, Дунай за рік виносить у Чорне море залежно від водності 33...64 млн т солей та 1,0...3,9 млн т біогенних речовин. Суттєвий вплив в утворенні річкових гідрохімічних аномалій відіграє господарська діяльність, а саме скидання у річки неочищених побутових й промислових

стоків та змив з ланів мінеральних добрив й пестицидів. У зонах надмірного зволоження мінералізація річкової води переважно гідрокарбонатно-кальцієва з вмістом 30...40 мг/л. В зонах недостатнього зволоження збільшується вміст в річковій воді сульфатів, хлоридів та нітратів. Разом з поверхневим стоком у водойми надходить значна кількість продуктів життєдіяльності організмів та розпаду органічних залишків. Вони зумовлюють високий хімічний вміст у поверхневих і підземних водах. Це є причиною хімічного вивітрювання, карстоутворення тощо. Особливою ефективністю відзначається діяльність мікроорганізмів в анаеробних умовах, що призводить до помітних змін хімічного складу та активності води.

**Озера** – це заповнені водою замкнені природні заглиблення на поверхні суші. Вони являють собою водойми уповільненого водообміну. Основними рисами їх режиму є вертикальна і горизонтальна неоднорідність та циркуляція води, акумуляція в улоговині твердих матеріалів, характер біоценозів і процес еволюції та відмирання водойми. Кожне озеро складається з улоговини, в якій розміщується водна маса з біоценозом організмів.

Залежно від особливостей формування водного балансу озера поділяють на добре проточні, мало проточні, безстічні, глухі та карстові. За кількістю розчинених у воді хімічних сполук озера бувають прісні (з мінералізацією менше 3%), солонуваті (з мінералізацією 3...25%) й солоні. Прісні озера переважають в зонах з надмірним та достатнім зволоженням. Підвищену мінералізацію мають води озер в зонах нестійкого й недостатнього зволоження. На хімізмі озер позначаються результати антропогенної діяльності.

**Болото** – це ділянка суші, для якої характерне надмірне зволоження прошарків ґрунту, застійний режим підземних вод та поширення специфічної болотної рослинності. Найважливішим процесом у болотах є торфоутворення внаслідок відмирання й перегнивання без доступу повітря рослин під водою з одночасним ущільненням. За потужністю торф'яного горизонту розрізняють власне болота (товщина шару торфу понад 30 см) й заболочені землі. Надмірно зволожені мінеральні ґрунти без торф'яного горизонту називають перезволоженими землями.

Суттєва роль у формування боліт належить нерозважливій господарській діяльності людини. В Україні загальний меліоративний фонд, тобто сукупність боліт, заболочених й перезволожених земель, становить 6 млн га. Основна частина меліоративного фонду припадає на Полісся.

**Підземні води** – це води, що знаходяться нижче рівня земної поверхні в товщах гірських порід верхньої частини земної кори. Вони не є суцільними потоками на зразок річок, струмків чи озер. Підземні води просочуються крізь тріщини між частинками гірських порід. Насичуючи

тріщини, порожнини в тріщинах гірських порід, підземні води знаходяться у рідкому, твердому чи газоподібному агрегатному стані.

У товщі літосфери виділяють такі види води: хімічно зв'язану, фізично зв'язану, пароподібну, у твердому стані, капілярну та гравітаційну.

Залежно від характеру взаємин з підземними водами гірські породи поділяються на водопроникні, водонепроникні та розчинні. Водопроникні породи здатні пропускати через себе воду. Ці породи бувають невологомісні (піски, галька, тріщинуваті граніти тощо) та вологовмісні (торф, мул, крейда). Водонесним горизонтом називають шар водопроникних порід, насичений водою, що фільтрується по тріщинах. Водонепроникні породи за умовами фільтрації є водотривкими горизонтами. На них накопичується вода, яка не проникає в глиб літосфери, і на них утримуються розташовані вище водонесні горизонти. Розчинні породи здатні утворювати порожнини, що розширюються під дією води. Такими породами є різні солі (калійна, кухонна); гіпси та карбонатні породи (вапняки, доломіти). Значні за розмірами порожнини утворюють підземні карстові печери.

За умовами залягання підземні води поділяють на ґрунтові, верховодні, підґрунтові та міжпластові. Ґрунтові води, що насичують верхню частину літосфери, утворюються внаслідок інфільтрації атмосферних опадів у ґрунтовий шар та частково поповнюються за рахунок конденсації водяної пари й капілярного всмоктування з нижчих водонесних горизонтів. Їх накопичення у ґрунтовому горизонті призводить до заболочування місцевості, а в умовах посушливого клімату через інтенсивне випаровування є причиною засолювання ґрунтів.

Верховодними водами називають підземні водонесні горизонти, що залягають на глибинах 2...10 м та мають через затримання інфільтраційних потоків води на обмежених ділянках незначне поширення по площині. Потужність насичених верховодних порід становить 0,4...1,0 м і вони мають постійний гідравлічний зв'язок з річками та водоймами. Якість води невисока і часто містить забруднювачі. Верховодна вода є причиною підтоплення фундаментів і підвалів споруд.

Підґрунтові води – це перший від поверхні постійно існуючий водонесний горизонт, розташований на значному за площею водотривкому шарі глибиною до 100 м. Їх живлення здійснюється за рахунок інфільтрації атмосферних опадів, фільтрації з річок, каналів та водойм і конденсації водяної пари у зоні аерації. Підґрунтові води безнапірні, їх глибина залягання, температура, мінералізація та витрата є змінними в часі.

Міжпластові води залягають у водопроникних шарах, що зверху і знизу затиснуті між пластами водотривких порід. Вони завжди мають природний напір. Геологічні структури, в межах яких розташовані міжпластові води, називають артезіанськими водами. Їх режим є стабільним, тому вони вважаються найважливішим джерелом водопостачання.

Запаси води на Землі становлять 1,39 млрд км<sup>3</sup>, але 96,5 % їх загального об'єму, що припадає на океан і моря, є гірко-солоними і непридатними для життя та технологічного використання. Маса прісної води планети досягає 35 млн км<sup>3</sup>, причому 80 % її запасів зосереджено в унікальному озері Байкал. Основним джерелом водопостачання людства є річковий стік. Щорічно на господарські потреби витрачається приблизно 13 % його об'єму, з якого у водойми повертається понад 600 км<sup>3</sup> забруднених стоків.

**В Україні протікає понад 22 тисячі річок**, з яких 3,5 тисячі мають довжину понад 10 км. Середня густота річкової мережі становить 0,25 км/км<sup>2</sup>. Сумарний річковий стік України без Дунаю в середній за водністю рік досягає 3,5 км<sup>3</sup> і зменшується до 55,9 км<sup>3</sup> у маловодні роки. Частка місцевого стоку становить відповідно 52,4 та 29,7 км<sup>3</sup>, а решта надходить транзитом з інших держав. З метою регулювання річкового стоку побудовано понад 1000 водосховищ загальним об'ємом 55,1 км<sup>3</sup>, включно шість великих водосховищ на Дніпрі. Побудовано також близько 28 тисяч ставків, 7 великих каналів довжиною близько 2000 км, а також 10 водоводів великого діаметра. Забір поверхневих вод в Україні становить близько 60 % місцевого стоку і нерівномірний в басейнах річок.

В прісних озерах України знаходиться 2,3 км<sup>3</sup> води, в солоних озерах і лиманах – 8,6 км<sup>3</sup>, а в болотах – близько 30 км<sup>3</sup>.

В Україні підземні води поширені по всій території і мають прогнозні запаси 20,9 км<sup>3</sup>. Близько 70 % населених пунктів користуються водою підземних горизонтів і майже 100 % сільських населених пунктів задовольняють свої потреби за рахунок підґрунтових вод або глибинних водоносних горизонтів.

Галузі господарства по відношенню до водних ресурсів поділяють на водоспоживачів та водокористувачів. Водоспоживачі забирають воду з гідросфери для використання у виробництві промислової та сільськогосподарської продукції і задоволення побутових потреб населення, а потім повертають у довкілля в меншій кількості та з іншими якісними характеристиками. Водокористувачі воду з гідросфери не забирають, а використовують її як середовище (транспорт, рибальство, спорт тощо) або як джерело енергії (гідроелектростанції). Вони також можуть змінювати якість води та гідрологічний режим. Структурну схему використання водних ресурсів наведено на рис. 3.3.

В нашій державі водомісткість валового національного продукту у кілька разів перевищує аналогічні показники інших країн Європи. Значна кількість підприємств використовує води у 2...10 разів більше, ніж необхідно за технологією. Причиною цього є застарілі технології, неналагоджений облік води, відсутність повторного використання води та оборотних систем. До 50 % води питної якості використовується на технологічні потреби. Тоді як близько 90 % потреби можна задовольнити

за рахунок повторного використання води в системах комунального та промислового водозабезпечення.

Втрати води під час транспортування перевищують 10...20 %. Всього понад 70 % населення України забезпечені централізованим водопостачанням. До 10 % досліджуваних проб з водопровідних мереж не відповідає гігієнічним нормативам. Стан водопровідних очисних споруд та технології підготовки питної води не відповідають сьогоденним вимогам.

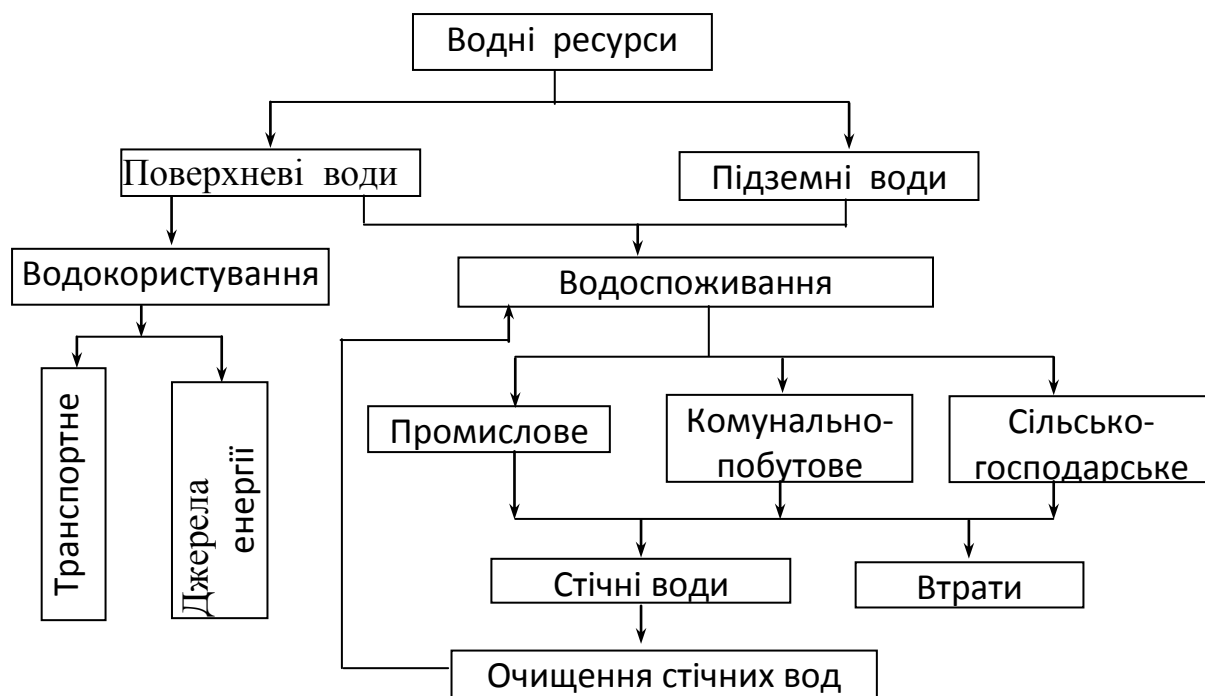


Рисунок 3.3 – Структурна схема використання водних ресурсів

В Україні щорічно використовується близько 30 км<sup>3</sup> води. Головними водокористувачами є сільське та комунальне господарство, енергетика та металургія (рис. 3.4).

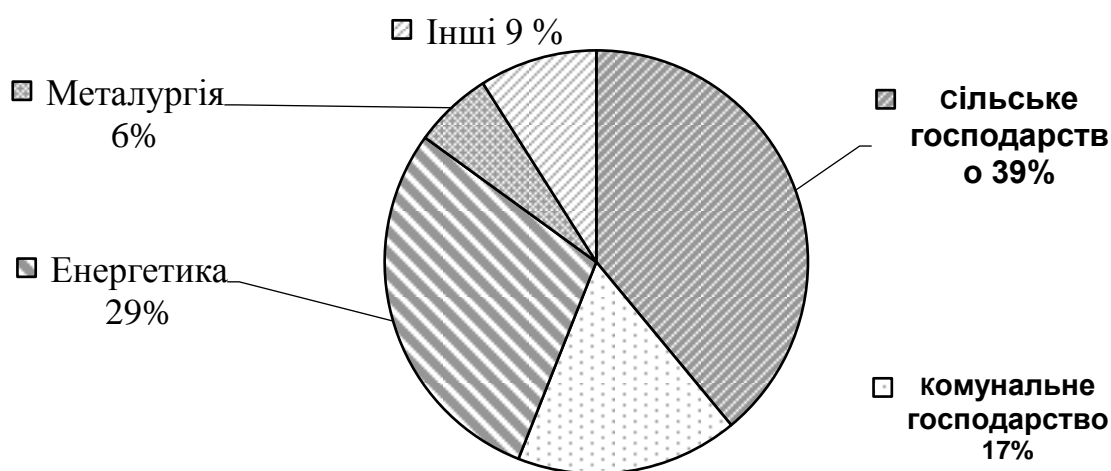


Рисунок 3.4 – Структура використання води галузями господарства України

### 3.2 Загальні аспекти забруднення гідросфери

Інтенсивне використання людством водних ресурсів призводить до значних кількісних та якісних змін гідросфери. Кількісні зміни зумовлені зміною кількості води, що придатна для господарського споживання, водного балансу та режиму річок. Якісні зміни відбуваються внаслідок скидання в гідросферу промислових, господарсько-побутових та сільськогосподарських стоків.

**Забруднювальні речовини** у водні об'єкти потрапляють такими шляхами:

- зі стічними водами промислових і сільськогосподарських підприємств та населених пунктів;
- від водного транспорту і споруд на берегах;
- з дощовими і талими водами, що змивають з земної поверхні побутовий бруд, нафтопродукти, добрива, отрутохімікати тощо;
- з атмосферними опадами, в яких містяться розчинені забруднювачі викидів в атмосферне повітря.

**Забруднення гідросфери** – це зміни якості води порівняно з її природним станом та нормами якості води за видами водокористування, що спричинені господарською діяльністю, і роблять воду частково або повністю непридатною для використання за цільовим призначенням.

Забруднювальні речовини гідросфери поділяють на мінеральні, органічні та біологічні. До мінеральних забруднювачів відносяться пісок, глина, шлаки, зола, розчини та емульсії солей, кислот та лугів, радіоактивні сполуки. Органічними забруднювачами є речовини тваринного та рослинного походження, смоли, феноли, спирти, фарбники, альдегіди тощо. До біологічних забруднювачів відносяться патогенні бактерії, віруси та збудники інфекцій.

Розрізняють три види забруднення вод: фізичне, хімічне та біологічне.

**Фізичне забруднення** води обумовлено зміною її фізичних властивостей, а саме вмісту мінеральних та інших нерозчинених домішок, прозорості, температури та радіоактивних речовин. Суспензії піску, намулу, глинистих частинок потрапляють у водойми за рахунок поверхневого змиву дощовими й талими водами на водозбірній площі. Пил потрапляє у водойми з сильними вітрами. Тверді частинки знижують прозорість води і погіршують її смакові якості та пригнічують процеси фотосинтезу водних рослин. Теплове забруднення водойм спричиняється скидами у водойми теплих вод від різних енергетичних установок. Атомні і теплові електростанції скидають у водойми 30...50 % теплової енергії, що виробляється. Теплове забруднення істотно змінює термічний та біологічний режим водойм.

**Хімічне забруднення** відбувається внаслідок надходження в гідросферу різних шкідливих домішок неорганічного (кислоти, луги, мінеральні солі) та органічного (нафта й нафтопродукти, органічні сполуки, миючі засоби, пестициди) походження. Більшість з них є токсичними для організмів водойм та населення. Хімічні речовини акумулюються рослинами й тваринами, які є продуктами харчування. Основними джерелами хімічного забруднення є доменне та сталеливарне виробництво, підприємства гірничодобувної, металургійної, целюлозно-паперової та нафтопереробної промисловості й екстенсивне сільське господарство.

**Біологічне забруднення** відбувається внаслідок надходження у гідросферу із стічними водами різних видів мікроорганізмів, рослин і тварин. Значна кількість з них є хвороботворними для людей, тварин і рослин. Біологічне забруднення призводить до епідеміологічних захворювань. Головними джерелами біологічного забруднення є комунально-побутові стоки, харчові відходи, стічні води підприємств харчової, целюлозно-паперової та хімічної промисловості. Особливо шкідливим є біологічне забруднення водойм у місцях масового відпочинку людей. Однією з причин біологічного забруднення є будівництво каскадів водосховищ на річках, що у декілька разів зменшує природну швидкість водообміну.

Надмірне забруднення об'єктів гідросфери в Україні веде до деградації водних екосистем. Основні причини забруднення такі:

- скид неочищених та недостатньо очищених промислових і комунально-побутових стічних вод безпосередньо у водні об'єкти та через системи міської каналізації;
- надходження у водні об'єкти забруднювальних речовин з поверхневим стоком із сільськогосподарських угідь та забудованих територій;
- ерозія ґрунтів на водозбірній площі внаслідок антропогенної діяльності.

Технологічні навантаження на природне середовище загалом та на водні ресурси зокрема досягли значних масштабів. У зв'язку з цим збільшуються ризики виникнення надзвичайних екологічних ситуацій та природно-техногенних катастроф.

У басейні Дніпра, ресурси якого становлять близько 80 % водних ресурсів України та забезпечують водою 32 млн населення та близько 70 % господарського потенціалу держави, очищення стічних вод до нормативних концентрацій забезпечується тільки на 25 %. Значної шкоди завдано водним ресурсам внаслідок катастрофи на Чорнобильській АЕС. На території басейнів Прип'яті та Дніпра зосереджено близько 450 тис. Кі цезію-137 та майже 70 тис. Кі стронцію-90. В критичному стані

перебувають малі річки, в які скидається 15 % стічних вод у басейні. Внаслідок цього вони втратили природну здатність до самоочищення.

У басейні річки Південний Буг в межах Вінницької області забір води становить 1,00...1,60 млн м<sup>3</sup> щорічно. Основними споживачами води є Ладжинська ТЕС та ВО «Вінницяводоканал». За загального щорічного водовідведення 900...1400 млн м<sup>3</sup> скид забруднених вод досягає 29 млн м<sup>3</sup>. Допускаються аварійні скиди, що наносять збитки державі через забруднення поверхневих вод. Спостерігається наявність забруднення підземних вод під впливом фільтрації забруднених стічних вод з полів фільтрації та накопичувачів.

### **3.3 Організація спостережень за забрудненням водного середовища**

Організація та проведення спостережень за забрудненням водного середовища виконується за такими принципами:

- комплексність і систематичність спостережень;
- узгодженість строків їх проведення з характерними гідрологічними ситуаціями;
- визначення показників якості води єдиними методами.

Реалізація цих принципів досягається відповідною програмою контролю за фізичними, хімічними, гідробіологічними та гідрологічними показниками. Контроль передбачає періодичність відбирання проб, їх аналізу за єдиними методиками з необхідною точністю. Мережа гідрохімічних спостережень за забрудненням водного середовища у просторі має охоплювати, за змоги, всі водні об'єкти, розташовані на території досліджуваного басейну, та всю довжину водотоку або всю акваторію водойми з визначенням впливу найбільших їх приток та скидів оборотних вод. Вона також має забезпечувати спостереження в різні за водністю роки та з врахуванням добових змін хімічного складу води і катастрофічних скидів оборотних вод у водні об'єкти.

Моніторинг водного середовища здійснюють в пунктах спостережень, під якими розуміють місце на водотоці чи водоймі, де виконують комплекс польових робіт для отримання даних про якість води. Пункти спостережень бувають стаціонарні, спеціалізовані для вирішення конкретних науково-дослідних задач та тимчасові експедиційні.

**Пункти спостереження** за кількісними й якісними показниками стану водного середовища організовують у районах:

- розташування міст і крупних селищ, стічні води яких скидаються у водойми та водотоки;

- скиду стічних вод територіально-виробничих комплексів окремо розташованих крупних промислових підприємств та організованого скиду сільськогосподарських стічних вод;

- передгреблевих ділянок річок, важливих для рибництва;

- місць нересту та зимівлі цінних водних організмів;

- перетину річками державних кордонів;

- гирл забруднених приток великих водотоків і водойм;

- на ділянках, що не зазнають прямого антропогенного впливу та які розташовані на територіях заповідників й національних парків.

Вибору місця пункту спостережень передують попередні дослідження, які передбачають:

- збір та аналіз відомостей про водокористувачів, джерела забруднення вод, аварійні скиди забруднювачів, про фізико-географічні, морфометричні та режимні характеристики водного об'єкта;

- обстеження водного об'єкта та прибережних водоохоронних смуг з метою визначення їх стану, додаткових джерел забруднення та зон забрудненості, виділення характерних біотипів.

Залежно від господарського значення водного об'єкта, якості води, його розмірів і водності пункти спостережень поділяють на чотири категорії, які визначають частоту контролю та детальність програми спостережень.

**Пункти спостережень першої категорії** розміщують на великих і середніх водних об'єктах, що мають важливе господарське значення:

- в районах міст з чисельністю населення більше 1 млн чол.;

- в районах організованого скиду оборотних вод, що призводить до значної забрудненості води;

- в місцях нересту та зимування особливо цінних видів промислових водних організмів;

- в районах повторюваних аварійних скидів забруднювальних речовин та заморних явищ серед водних організмів.

**Пункти спостережень другої категорії** розташовують переважно на водотоках і водоймах:

- в районах міст з населенням 0,5...1,0 млн чол.;

- в місцях організованого скиду дренажних оборотних вод із зрошуваних територій та промислових стічних вод;

- на важливих для рибництва передгреблевих ділянках рік;

- в місцях нересту та зимування цінних видів промислових організмів;

- в районах із середньою забрудненістю води;

- на перетині річками державних кордонів.

**Пункти контролю третьої категорії** влаштовують на водних об'єктах:

- в районах міст з населенням до 0,5 млн чол.;
- в гирлах забруднених приток великих рік і водойм;
- в районах організованого скиду оборотних вод, що призводить до низької забрудненості поверхневих вод;
- на замикальних ділянках великих і середніх рік.

**Пункти спостереження четвертої категорії** встановлюють:

- на незабруднених ділянках водних об'єктів;
- на водотоках і водоймах, які розташовані в державних заповідниках і національних парках, та на територіях з унікальними природними утвореннями.

У місцях спостережень влаштовують один або декілька створів, під яким розуміють умовний поперечний розріз водного об'єкта, в якому виконують комплекс робіт для визначення якості води. Створ розміщують з урахуванням гідрометеорологічних та морфометричних особливостей водного об'єкта, розміщення джерел забруднення, об'єму, складу і властивостей скидних оборотних вод та з врахуванням вимог водокористувачів і водоспоживачів.

Один створ розміщують на водотоках за відсутності організованого скиду оборотних вод в гирлах забруднених приток, на незабруднених ділянках водостоків, на замикальних і передгребливих ділянках річок та в місцях перетину державних кордонів. Два та більше створів передбачають на водотоках за наявності організованого скиду оборотних вод. Один з них встановлюють вище джерела забруднення, а інші – нижче джерела забруднення.

Кількість вертикалей у створі водостоків, на яких відбирають проби води, залежить від умов змішування річкових вод із оборотними чи водами приток. У разі однорідного хімічного складу встановлюють одну вертикаль по стрижню водотоку. За неоднорідного хімічного складу передбачають не менше трьох вертикалей, одна на стрижні, а інші на віддалі 3...5 м від берега. Кількість вертикалей у створі водойми визначається шириною забрудненості зони. Першу вертикаль влаштовують на відстані 0,5 км від берега чи місця скиду оборотних вод, а останню – безпосередньо за межею зони забруднення.

Кількість горизонтів на вертикалі залежить від глибини водного об'єкта у місці вимірювання. За глибини до 5 м встановлюють один горизонт. Влітку проби води беруть на глибині 0,2...0,3 м від поверхні водного дзеркала, а взимку – біля нижньої поверхні льоду. За глибини 5...10 м встановлюють горизонти біля поверхні води та на відстані 0,5 м від дна. За глибини 10...50 м встановлюють три горизонти. У цьому випадку проміжний горизонт передбачають на половині глибини водного об'єкта.

За глибини більше 50 м встановлюють такі горизонти: біля поверхні, на глибинах 10, 20, 50, 100 м та біля дна. За різкої зміни густини води встановлюють додаткові горизонти в кожному шарі.

Організацію спостережень за якістю води виконують за відповідними програмами, які вибирають залежно від категорії пункту спостережень з врахуванням цільового використання водного об'єкта. Параметри, дослідження яких визначене програмами спостережень за гідрологічними й гідрохімічними показниками, наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Програми спостережень за якістю поверхневих вод за гідрологічними та гідрохімічними показниками

Показники	Види програм			
	обов'яз- кова	скорочені		
		1	2	3
<b>Гідрологічні:</b>				
Витрати води (на водотоках), $m^3/c$ , або рівень (на водоймах), $m$	+	+	+	+
Швидкість течії (на водотоках), $m/c$	+	-	-	+
<b>Гідрохімічні:</b>				
Візуальне спостереження	+	+	+	+
Температура, $^{\circ}C$	+	+	+	+
Колірність, <i>град.</i> ; прозорість, <i>см</i> ; запах, <i>бали</i>	+	-	-	-
Концентрації розчинених у воді газів, $mg/l$ :				
- кисню	+	+	-	+
- двоокису вуглецю	+	-	-	-
Концентрація завислих речовин, $mg/l$	+	-	+	+
Водневий показник (pH)	+	+	+	+
Окисно-відновний потенціал (Eh), $mB$	+	-	-	-
Питома електропровідність, $Om/cm$	-	+	+	-
Концентрації головних іонів <sup>1)</sup> , $mg/l$ : хлоридних, сульфатних, гідрокарбонатних, кальцію, магнію, натрію, калію, суми іонів	+	-	-	-
ХПК, $mg/l$	+	-	+	+
БПК <sub>5</sub> , $mg/l$	+	-	+	+
Концентрації біогенних елементів, $mg/l$ : амонійних, нітритних, нітратних іонів, фосфатів, заліза загального, кремнію	+	-	-	-
Концентрації широко поширених забруднюючих речовин, $mg/l$ : нафтопродуктів, СПАР, летких фенолів, пестицидів і сполук металів	+	-	-	-
Концентрації двох-трьох забруднюючих речовин, основних для води в даному пункті контролю, $mg/l$	-	-	+	-
Концентрації всіх речовин, що забруднюють воду в даному пункті контролю, $mg/l$	-	-	-	+

<sup>1)</sup> За наявності нижче джерела забруднення декількох створів концентрацію головних іонів вимірюють тільки в першому створі після скиду оборотних вод.

Періодичність проведення спостережень за гідрологічними та гідрохімічними показниками встановлюють згідно з категорією пункту спостережень (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – **Періодичність проведення спостережень за гідрологічними та гідрохімічними показниками**

Періодичність проведення спостережень	Програми для пунктів спостережень категорії			
	I	II	III	IV
<i>Щоденно</i>	Скорочена 1	Візуальні спостереження	-	-
Щодекади	Скорочена 2	Скорочена 1	-	-
Щомісяця	Скорочена 3			-
В основні фази водного режиму	Обов'язкова			

**Частота відбирання проб води** в контрольних створах залежить від якості води, її витрат та інших гідрологічних характеристик, змінності якості води протягом року, кількості та складу оборотних вод, категорії пункту спостережень, економічних та технічних можливостей. Мінімальна кратність відбирання проб за обов'язковою програмою для рівнинних річок становить 7 разів на рік. Проби відбирають в характерні гідрологічні періоди: в період весняної повені (на підйомі, піку і спаді); під час літньої межені (за найменших витрат та за проходження дощового паводку); восени перед льодоставом та під час зимової межені.

У водоймах якість води визначають: на початку весняного та у період максимального наповнення; в літньо-осінній період за найбільш низького рівня води; взимку за найбільш низького рівня та найбільшої товщини льоду.

Скорочену програму організації спостережень за якістю поверхневих вод залежно від обсягів робіт поділяють на три види:

- перша програма містить візуальні спостереження, визначення витрати води в водотоках, рівня води в водоймах, температури, концентрації розчиненого кисню та питомої електропровідності;

- друга програма передбачає візуальні спостереження, визначення витрат води в водотоках, рівня води в водоймах, температури, рН, питомої електропровідності, концентрації завислих речовин, біохімічної потреби в кисні (БПК<sub>5</sub>), хімічної потреби в кисні (ХПК), концентрації основних для цього пункту двох-трьох забруднювальних речовин;

- третя програма містить візуальні спостереження, визначення витрат води та швидкості течії водотоку, рівня води в водоймі, температури, рН, концентрації завислих речовин, розчиненого кисню, ХПК, БПК<sub>5</sub>, концентрації всіх забруднювальних речовин в цьому пункті.

Організація систематичних спостережень за гідрохімічним режимом водного об'єкта передбачає проведення польових робіт на самому об'єкті та аналіз проб води в хімічній лабораторії. З метою отримання репрезентативних результатів якості води аналізи необхідно виконувати в умовах хімічних лабораторій. Через те, що в складі проби води є інгредієнти, які змінюють свій стан, аналізи виконують безпосередньо в польових умовах.

Послідовність виконання робіт в польових умовах під час відбирання проби з поверхні передбачає визначення прозорості і кольору, смаку і запаху, температури, вмісту іонів водню (рН), діоксиду вуглецю (CO<sub>2</sub>), карбонатних іонів і кисню.

Проби води з річкової глибини беруть за допомогою батометра. Проби води для аналізу в хімічній лабораторії законсервовують різними методами, щоб вони не втратили свого якісного складу. Консервація не забезпечує постійного складу проби на необмежений строк, тому аналізи необхідно здійснювати у найкоротший термін.

В лабораторії визначають органолептичні та хімічні показники води. До органолептичних показників відносять такі, що діють на органи чуття людини: запах і смак, прозорість, мутність, колірність, вміст завислих речовин.

Хімічними показниками якості води є активна реакція (рН), вміст розчинених газів, заліза, хлоридів, сульфатів, сполук азоту, окисність та біологічна потреба в кисні. Для повної характеристики водного об'єкта дані хімічного аналізу води доповнюються її бактеріологічними характеристиками, а саме мікробним числом, колі-титром та колі-індексом.

### **3.4 Оцінювання якості водного басейну та прогнозування його стану**

Якість води характеризується її складом та властивостями, які визначають придатність води для конкретних видів водокористування. Оцінювання якості води здійснюється за санітарними, токсикологічними та органолептичними показниками. Норми якості води водного басейну встановлюються для комунально-побутового, господарсько-питного і рибогосподарського видів водокористування.

**Гранично-допустимою** концентрацією (ГДК) у воді водного об'єкта господарсько-питного та культурно-побутового використання є така концентрація шкідливої речовини у воді, яка не впливає безпосередньо чи опосередковано на здоров'я людини впродовж всього життя, не викликає несприятливих наслідків у її нащадків і не погіршує гігієнічних умов водокористування. Гранично-допустимою концентрацією у воді водного об'єкта, що використовується для рибогосподарських цілей, є концентрація шкідливих речовин, яка не впливає негативно на популяції риб, особливо промислових.

Граничні концентрації та норми вмісту речовин в джерелах водокористування регламентуються відповідними нормами і правилами. Загальні вимоги до складу і властивостей води водних об'єктів господарсько-питного, комунально-побутового та рибогосподарського водовикористання наведено в табл. 3.3.

**Таблиця 3.3 – Вимоги до складу і властивостей води водних об'єктів господарсько-питного, комунально-побутового та рибогосподарського водокористування**

Показники	Водокористування				
	господарсько-питне	комунально-побутове	рибогосподарське категорії		
			вищої	I	II
1	2	3	4	5	6
Завислі речовини	Допускається приріст до фону не більше ніж на: 0,25 мг/л   0,75 мг/л   0,25 мг/л   0,75 мг/л Для водойм, що містять у межах більше 30 мг/л природних мінеральних речовин, допускається збільшення вмісту на 5 %. Випуск зависі із швидкістю осадження більше 0,4 мм/с для водостоків та більше 0,2 мм/с для водосховищ заборонений				
Плаваючі домішки	Не допускаються плівки нафтопродуктів, мастил, жирів та інших плаваючих домішок				
Запахи, присмаки, забарвлення	Допускаються запахи і присмаки інтенсивністю не більше 2 балів (безпосередньо чи після хлорування води). Забарвлення не має виявлятися у стовпчику води висотою: 20 см   10 см		Сторонні запахи, присмаки та забарвлення води, що впливають на м'ясо риб, не допускаються		
Температура	Допускається підвищення не більше ніж на 3 °С відносно середньомісячної температури найбільш жаркого місяця року за останні 10 років		Допускається підвищення не більше ніж на 5 °С відносно природної температури води (за наявності холодноводних риб загальна температура води не має перевищувати 20 °С влітку і 5 °С взимку; в решті випадків – відповідно 28 та 8 °С)		
pH	Водневий показник pH не має виходити за межі 6,5–8,5				
Мінеральний склад води	Сухий залишок не більше 1000 мг/л, зокрема хлоридів до 350 мг/л і сульфатів до 500 мг/л		Не нормується		
Розчинений кисень	Не має бути менше 4 мг/л у будь-який період в пробі, відібраній до 12 години дня		Не має бути менше 6 мг/л		Взимку під льодом не менше 4, влітку – не менше 6 мг/л

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6
БПК <sub>ПОВН</sub>	Не має перевищувати при 20°C				
	3,0 мг O <sub>2</sub> /л	6,0 мг O <sub>2</sub> /л	3,0 мг O <sub>2</sub> /л (якщо взимку вміст кисню у воді зменшується для водойм вищої і I категорії до 6 мг/л, II категорії до 4 мг/л, то дозволяється тільки скид води, що не впливає на БПК)		
ХПК	Не має перевищувати		Не встановлено		
	15,0 мг O <sub>2</sub> /л	30,0 мг O <sub>2</sub> /л			
Збудники хвороб	Не допускаються (після знезаражування біологічно очищених вод колі-індекс не має перевищувати 1000 за вмісту залишкового хлору 1,5 мг/л)		-		

**Гранично-допустимий скид (ГДС)** – показник максимально допустимої в одиницю часу маси речовини, що відводиться із оборотними водами у поверхневі та морські води, який з урахуванням встановлених обмежень на скид цієї речовини від інших джерел забруднення гарантує дотримання її вмісту в заданих контрольних створах водного об'єкта. Основними категоріями оборотних вод, для яких передбачені ГДС речовин, є стічні, дренажні та скидні води. Кожне підприємство має забезпечувати дотримання нормативів ГДС.

Оборотні води можуть містити речовини, у разі скидання яких має враховуватися їх комплексна дія. Негативний ефект в цьому випадку більший, ніж дія окремого компонента. Тоді сума приведених концентрацій речовин, тобто відношень концентрацій ( $C_i$ ) кожної з речовин, що мають ефект сумарної дії, до відповідних гранично-допустимих концентрацій ( $ГДК_i$ ) у воді водного об'єкта, не має перевищувати одиниці

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i} \leq 1. \quad (3.1)$$

Оцінити прогнозовану якість водного басейну можна за допомогою методу розчинення оборотних вод у водопотоках і водоймах. Суть цього методу – зниження концентрації забруднювальних речовин у водоймі і водопотоці. Інтенсивність цього процесу характеризується кратністю розчинення і визначається за формулою:

$$n = \frac{Q + Q_3}{Q_3}, \quad (3.2)$$

де  $Q$  – витрата водного потоку;

$Q_3$  – витрата оборотних вод, що скидаються у водойму або водопотік.

Кратність розчинення можна визначити також через концентрації:

$$n = \frac{C_3 - C_B}{C - C_B}, \quad (3.3)$$

де  $C_3$ ,  $C_B$ ,  $C$  – концентрація забруднювальних речовин відповідно в оборотній воді, водоймі і водопотоці до випуску.

За певних припущень, а саме, потік безмежний, початкове розчинення відсутнє, випуск зосереджений, за методом Родзиллера максимальна концентрація в умовах стаціонарної лінійної задачі визначається із залежності:

$$C_{\max} = C + (C_3 - C) \exp(-\alpha \sqrt[3]{L}), \quad (3.4)$$

де  $C$  – концентрація в створі повного перемішування;

$\alpha$  – коефіцієнт, що враховує гідравлічні умови змішування;

$C_3$  – концентрація забруднювальних речовин у оборотній воді;

$L$  – відстань розчинення випуску скидних вод.

Метод Лапшева описує закономірності, що проходять в струминному потоці з врахуванням початкового розчинення під час зосереджених і розсіяних випусків. Кратність початкового розчинення в цьому випадку визначається за формулою:

$$n_{\Pi} = \frac{0,248}{1-m} d^2 \left( \sqrt{m^2 + 8,1 \frac{1-m}{d^2}} - m \right), \quad (3.5)$$

де  $m$  – емпіричний параметр;

$d$  – відносний діаметр струменя в розрахунковому створі.

Розбавлення оборотних вод у водосховищах і озерах визначається характером перемішування водних мас вітровими течіями. В місцях випуску оборотних вод утворюється сильно забруднена зона. В цій зоні початкова концентрація речовин ( $C_{\Pi}$ ) суттєво не відрізняється від їх

концентрації у оборотних водах ( $C_3$ ). Величина  $C_{II}$  залежить від початкового розбавлення оборотних вод ( $n_{II}$ ), яке відбувається безпосередньо біля випуску.

Кратність початкового розбавлення залежить від кількості оборотних вод та швидкості їх руху під час входу у водойму, глибини водойми і швидкості течії в місці випуску та місця випуску оборотних вод по глибині водойми і обчислюється за залежностями:

- в разі випуску в мілководдя або у верхню третину глибини

$$n_{II} = \frac{Q_3 + 0,00215 V H_C^2}{Q_3 + 0,000215 V H_C^2}; \quad (3.6)$$

- в разі випуску у нижню третину глибини

$$n_{II} = \frac{Q_3 + 0,00158 V H_C^2}{Q_3 + 0,000079 V H_C^2}, \quad (3.7)$$

де  $Q_3$  – витрати оборотних вод, м<sup>3</sup>/с;

$V$  – швидкість вітру над водою в місцях випуску оборотних вод, м/с;

$H_C$  – середня глибина водойми поблизу випуску, м.

Під час переміщення водних мас під дією вітрової течії відбувається основне розбавлення оборотних вод. Внаслідок чого початкова концентрація забруднювальних речовин поступово зменшується. У забрудненій смузі утворюється найбільш забруднена струмина з максимальними концентраціями речовин.

Кратність основного розбавлення ( $n_0$ ) в цій струмині для розрахункового пункту визначають за залежностями:

- в разі випуску в мілководдя або у верхню третину глибини

$$n_0 = 1 + 0,412 (L/\Delta X)^{0,627+0,0002 L/\Delta X}, \quad (3.8)$$

$$\Delta X = 6,53 H_C^{1,167}, \quad (3.9)$$

- в разі випуску у нижню третину глибини

$$n_0 = 1,85 + 2,38 (L/\Delta X)^{0,41+0,0064 L/\Delta X} \quad (3.10)$$

$$\Delta X = 4,41 H_C^{1,167}, \quad (3.11)$$

де  $L$  – відстань від випуску оборотних вод до розрахункового пункту, м.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте загальну характеристику гідросфери.
2. Охарактеризуйте водні об'єкти.
3. Поясніть структуру використання водних ресурсів.
4. Як і які види забруднювачів потрапляють у водні об'єкти?
5. Назвіть основні причини забруднення водного середовища.
6. Наведіть модель техногенного навантаження на водні ресурси України.
7. Як і де організовують спостереження за забрудненнями водного середовища?
8. Охарактеризуйте категорії пунктів спостережень.
9. Дайте аналіз програми спостережень за якістю поверхневих вод.
10. Наведіть інтегральні показники забруднення водного басейну.
11. Які вимоги до якості водного басейну?
12. Проаналізуйте методи оцінювання прогнозованого стану водного басейну.
13. Розкрийте суть моделювання процесів забруднення та очищення річкових вод.

## 4 МОНІТОРИНГ ЛІТОСФЕРИ

### 4.1 Ґрунтово-земельні ресурси літосфери та антропогенний вплив на них

Матеріальною основою формування ґрунтового покриву, як складової розвитку біоценозів, є літосфера. **Літосфера** – це верхня оболонка Землі з земною корою та частиною верхньої мантії Землі, що складається з осадових, вивержених та метаморфічних порід. Потужність літосфери 25...200 км. Земна кора – тонка верхня оболонка Землі, що становить 30...80 км на континентах і 5...10 км під океаном. На континентах кора складається з осадового, гранітного та базальтового шарів.

**Ґрунтом** називають поверхневий шар земної кори, що утворюється за сукупної дії води, сонячної енергії, повітря та організмів на гірські породи. Ґрунт складається з трьох ґрунтових горизонтів певного кольору, що відрізняються хімічним складом та властивостями. Верхній – перегнійно-акумулятивний горизонт, темного кольору, багатий гумусом та кореневою системою рослин. Другий горизонт – ілювіальний, в якому затримуються та накопичуються речовини з верхнього горизонту. Третій горизонт – материнська порода.

У ґрунті зосереджена майже половина рослинної речовини суші. Він є середовищем існування та субстратом для різних живих організмів: кількість бактерій у ґрунті 1000...7000 кг/га, мікрогрибів – 100...1000 кг/га, водоростей – 10...300 кг/га, дощових черв'яків – 350...1000 кг/га, членистоногих до 1000 кг/га та найпростіших 5...10 кг/га. Ґрунт та мікроорганізми є універсальними природними біологічними адсорбентами, що виконують функції нейтралізатора забруднень. Система «ґрунт – рослини» забезпечує людство продуктами харчування, біологічною сировиною, матеріалами і паливом.

Ґрунт характеризується такими фізичними властивостями: механічний склад, відносна пухкість структури, водопроникність, аераційність, відсутність світла, амплітуда коливань температури, об'єм ґрунтового повітря.

Механічний склад – відносний вміст в ґрунті частинок різного розміру. Залежно від вмісту піску і глини ґрунти поділяють на піщані, супіщані, суглинисті та глинисті. Класифікацію ґрунту за механічним складом наведено в табл. 4.1.

Ґрунт характеризується сезонним та добовим температурним режимом. Поверхневий його шар поглинає сонячну енергію і для нього притаманні найбільші перепади температури. Влітку верхній шар ґрунту накопичує теплову енергію, яку віддає в навколишнє середовище взимку. В нічні години нагріта поверхня випромінює надлишок тепла і

оохолоджується. Глибші шари ґрунту зберігають більш високу температуру. Чим сухіший ґрунт і вища інсоляція, тим на більшій глибині відбуваються зміни температури.

Таблиця 4.1 – Класифікація ґрунту за механічним складом

Механічні елементи	Діаметр, мм
Каміння	> 3,0
Гравій	3,0...1,0
Пісок крупний	1,0...0,5
Пісок середній	0,5...0,25
Пісок дрібний	0,25...0,05
Пил крупний	0,05...0,01
Пил середній	0,01...0,005
Пил дрібний	0,005...0,001
Мул грубий	0,001...0,0005
Мул тонкий	0,0005...0,0001
Колоїди	< 0,0001

Важливою характеристикою ґрунтів є вологість. Вологість залежить від фізичних і хімічних властивостей, режиму рідких й твердих опадів, сонячної енергії. Вода в ґрунті знаходиться в таких формах: пароподібній, хімічно та фізично зв'язаній, капілярній та гравітаційній. Наявність та режим води в ґрунті обумовлюють життєдіяльність мікроорганізмів та рослин.

В ґрунті також міститься повітря, кількість якого визначається його пористістю і водним режимом. Сухий ґрунт містить повітря у всіх порожнинах. У випадку збільшення вологості ґрунтового повітря витісняється водою. В сильно зволжених ґрунтах вільне повітря практично відсутнє. Із збільшенням глибини кількість кисню в ґрунті зменшується, а вуглекислого газу – збільшується і досягає 10 %. Внаслідок дифузії, зменшення кількості води, зміни атмосферного тиску та теплового розширення ґрунтового повітря постійно оновлюється атмосферним.

Живлення рослин відбувається за рахунок іонного складу ґрунтового розчину. Хімічними характеристиками ґрунту є вміст мінеральних речовин, засоленість ґрунтового середовища та реакція ґрунтового розчину. Частка мінеральних речовин у ґрунтовому розчині не більше 0,2...0,3 %. Вони присутні в органічних залишках, ґрунтових колоїдах та гумусі. Засолені ґрунти розрізняють за складом солей (NaCl, MgCl<sub>2</sub>, CaCl<sub>2</sub>,

Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) і ступенем засоленості. Ґрунти, що знаходяться під дією постійного й сильного зволоження соляними водами, називають солончакми. Ґрунти, в яких надлишок солей знаходиться в глибоких шарах і вологість змінюється, вважають солонцями.

Реакція ґрунтового розчину – концентрація в ньому водневих іонів (рН). За цією ознакою ґрунти поділяють на нейтральні (рН = 7), кислі (рН < 7) та лужні (рН > 7).

Індикатором фізичного й хімічного складу ґрунту та його забруднення є рослини, що ростуть на них. Ґрунти разом з організмами утворюють складні екосистеми, які виконують у біосфері найважливіші функції:

- безперервну трансформацію та перерозподіл сонячної енергії, яка надходить на земну поверхню, й протікання процесів біогенного накопичення;

- підтримання планетарного кругообігу біогенних елементів.

Головною властивістю ґрунтів є їх родючість, тобто здатність забезпечувати рослини необхідними мінеральними солями, органічними речовинами, вологою і давати врожай. В процесі біохімічного розкладання органічних речовин, коли недостатньо кисню, утворюється до 10...15 % неорганічних сполук (оксиди вуглецю та азоту, аміак, вода тощо) та 85...90 % стійких високомолекулярних органічних речовин (гумінові кислоти, фульвокислоти та їх солі). Ці стійкі високомолекулярні речовини називаються гумусом, який забезпечує родючість ґрунтів. Кількість гумусу в ґрунтах визначається комплексом природних умов і змінюється в різних фізико-географічних зонах в широких межах. До 70...90 % гумусу містять чорноземи, що сформувалися протягом тисячоліть у зонах лугових степів зі сприятливим кліматом.

Ґрунти вкривають майже всю сушу планети, але оброблювальний ґрунт в розрахунку на душу населення становить один гектар, а орні землі – лише 0,4 га. На жаль ці показники постійно зменшуються з огляду на приріст населення.

**Земельний фонд України становить 60,4 млн га.** Він включає 41,8 млн га сільгоспугідь, у тому зокрема 33,2 млн га ріллі та 7,6 млн га природних кормових угідь. Тільки 8 % території країни ще знаходяться у природному стані (болото, озера та гірські масиви).

В розрахунку на одного мешканця України припадає 0,82 га сільгоспугідь, зокрема 0,65 га ріллі. У середньому в Європі ці показники становлять відповідно 0,44 та 0,25 га. Природна якість угідь нашої держави має один з високих рейтингів за родючістю ґрунтів. Близько 42 % всієї території покрито найбільш родючими чорноземами та лугово-чорноземними ґрунтами.

Підвищенню родючості та покращанню інших властивостей ґрунтів сприяють такі антропогенні фактори: правильний обробіток, внесення органічних та мінеральних добрив, зрошування та осушування, захист від ерозії, полезахисне лісорозведення, охорона ґрунтової флори і фауни тощо.

**Основною причиною деградації та забруднення ґрунтів є антропогенна діяльність.** До чинників погіршення якостей ґрунту відносяться:

- зменшення родючості ґрунту за рахунок винесення поживних речовин із врожаєм;
- забруднення ґрунтів шкідливими для рослин та ґрунтових процесів засобами хімізації та техногенними викидами;
- розвиток ерозійних процесів внаслідок нерозважливого господарювання;
- засолення ґрунту під час зрошування невідосконаленими технологіями подачі води до рослин;
- перезволоження, яке сприяє заболоченню;
- ущільнення ґрунту внаслідок використання важкої сільсько-господарської техніки та нерегульованого випасання худоби;
- безпосереднє руйнування в процесі будівництва та видобутку корисних копалин, розкорчовування;
- займання ґрунтів під водосховища, дороги, споруди та будівлі;
- зміни ландшафту, які призводять до осушування чи заболочування внаслідок зміни мікроклімату та кругообігу вологи.

За екстенсивного розвитку господарського комплексу та відсутності природоохоронних заходів порушено оптимальний екологічний стан земельних ресурсів. Це призвело до критичного на межі виснаження стану ґрунтів (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Якісна характеристика сільгоспугідь України

Характеристика погіршення якостей сільськогосподарських угідь	Питома вага в загальній площі, %
Дефляційно небезпечні	51,7
Підлеглі водній ерозії	33,6
Кислі	30,8
Перезволожені	5,7
Солонцюваті	5,6
Заболочені	5,2
Засолені	4,6
З солонцевими комплексами	1,6
Кам'янисті	1,2

Внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС радіонуклідами (цезієм та стронцієм) на Україні забруднено понад 4,6 млн га земель у 74 районах 11 областей, зокрема 3,1 млн га ріллі.

## 4.2 Організація спостережень за забрудненням ґрунтів

**Державний моніторинг земель** складається із систематичних спостережень за їх станом, який передбачає зйомки, обстеження та вишукування з метою виявлення змін та оцінювання:

- стану використання угідь, полів, ділянок;
- процесів, пов'язаних із змінами родючості ґрунтів (розвиток водної і вітрової ерозії, втрата гумусу, погіршення структури ґрунту, заболочення і засолення), заростання сільськогосподарських угідь, забруднення земель пестицидами, важкими металами, радіонуклідами та іншими токсичними речовинами;
- стану берегових ліній річок, озер, водосховищ, морів, заток, лиманів, гідротехнічних споруд;
- процесів, пов'язаних з утворенням ярів, зсувів, сільовими потоками, землетрусами, карстовими, кріогенними та іншими явищами;
- стану земель населених пунктів, територій, зайнятих нафтогазодобувними об'єктами, очисними спорудами, гноєсховищами, складами паливомастильних матеріалів, добрив, стоянками автотранспорту, захороненням токсичних промислових відходів і радіоактивних матеріалів, а також іншими промисловими об'єктами.

Концепція моніторингу ґрунтів в Україні була розроблена наприкінці 80-х років минулого століття. У ній розглянуто просторово-тимчасову систему спостережень для оцінювання і прогнозу стану ґрунтів. Концепція містить кілька видів моніторингу.

**Фоновий** (еталонний) – вихідна оцінка, умовно прийнята за нульову позначку, відносно якої порівнюються одержані дані у рамках поточних спостережень. Через те, що для ґрунту, який тривалий час використовується у виробництві, одержати такого роду оцінку практично неможливо, за нульову беруть характеристики ґрунтів на цілині, заповідній ділянці, у лісі. За неможливості одержати зазначену оцінку через відсутність об'єкта (наприклад, суцільну розораність) до фонового можна віднести початковий цикл спостережень, що умовно вважають нульовою оцінкою. Наприклад, усі порівняння в агрохімічному обстеженні (їх було в Україні вже 7 турів кожні 5 років) здійснюють відносно першого туру.

Як фонові у ґрунтовому моніторингу можуть також використовуватися модальні (що найчастіше трапляються) фізичні, хімічні, біологічні характеристики, а також середній вміст елементів у породі (кларки). Такого роду нульові оцінки можуть виявитися достатніми для висновку про просторово-тимчасову диференціацію ґрунту або свідчити про акумулятивні тенденції за антропогенного забруднення ґрунтового покриву.

Як еталон також рекомендують використовувати такі характеристики, як здатність продукувати органічну речовину за певних кліматичних ресурсів або біопродуктивність.

Зрештою, як еталони можуть виступати оптимальні параметри ґрунтів, під час створення яких у кореневмісному шарі культурні рослини здатні максимальною мірою реалізувати свій потенціал.

Таким чином, концепція моніторингу ґрунтів, прийнята в Україні, передбачає використовувати кілька еталонів, що дає змогу оцінити сучасний стан розораних ґрунтів відносно природних аналогів, тенденції в їхніх змінах, а також визначити основний зміст коригувальних заходів.

**Виробничий** (базовий, поточний) – власне моніторинг як систематичні поточні спостереження за ґрунтом у просторі і часі. У концепції встановлено принципи вибору об'єктів, програму і методи вимірювання, сформульовано вимоги до організації спостережень, математичного та програмного забезпечення, метрології і стандартизації, нормування оцінок стану ґрунтів. Нарешті, у концепції визначено кінцеві результати моніторингу, що являють собою картографо-аналітичну автоматизовану інформаційну систему, прогноз змін ґрунтів і техніко-економічне обґрунтування заходів з охорони ґрунтів.

**Кризовий** – моніторинг ґрунтів, у яких істотно порушені екологічні і продуктивні функції (порівняно з досягнутим середнім багаторічним рівнем), і які перейшли на деградаційний шлях розвитку. Кризовий моніторинг – це особливо оперативний контроль забруднених, засолених, еродованих та інших деградованих ґрунтів, що перебувають у катастрофічному (згідно з об'єктивними нормативними оцінками і попереднім районуванням) стані. Це аналог моніторингу «hot spots», відомого в багатьох європейських країнах.

**Спеціальний** – по суті, відомчий, фрагментарний – це система спостережень над одним або кількома процесами. До спеціального можуть бути віднесені меліоративний моніторинг – спостереження, головним чином, за окремими (так званими меліоративними) властивостями ґрунтів; радіаційний моніторинг – спостереження за поведженням радіонуклідів у системі «ґрунт – рослина – тваринницька продукція». До цього ж виду можна віднести моніторинг окремих категорій земель: урбомоніторинг – спостереження за штучними ґрунтоподібними субстратами і «закритими» ґрунтами в населених пунктах; моніторинг ґрунтів під багаторічними насадженнями – у лісах, садах, виноградниках; моніторинг рекультивованих земель, земель особливого призначення (військові полігони, землі біля водойм – землі водного фонду, транспорту, резерву, рекреаційні землі та ін.). Цілком зрозуміло, що такого роду моніторинг у кожному конкретному випадку має свою специфіку, яка полягає, насамперед, у переліку моніторингових показників.

**Науковий** (прогностичний) – інформація підвищеної точності й ємності, за допомогою якої можна якісно збагатити виробничий

моніторинг, значною мірою уточнити зміст управлінських рішень і, головне, створити більш надійні прогностичні моделі. Такий моніторинг подано тривалими польовими дослідженнями, балансовими і лізиметричними дослідженнями, імітаційними та математичними моделями.

Довгострокові спостереження за забрудненням ґрунтів здійснюються на мережі спостережень гідрометеорологічної служби і мають на меті виявлення змін забруднення ґрунтів в містах та на сільськогосподарських землях, що спричинені викидами забруднювальних речовин промисловими підприємствами, застосуванням мінеральних добрив та отрутохімікатів. Крім цього, моніторинг здійснюють відповідні структурні підрозділи Міненергоресурсів, Мінагрополітики та інших міністерств і відомств.

**Обов'язковими є спостереження за забрудненням ґрунтів за такими інгредієнтами:** за вмістом важких металів (свинець, ртуть, кадмій, миш'як); бензопіренів; біогенних елементів (азот, фосфор); ядохімікатів і пестицидів.

Найнебезпечними є пестициди як найбільш активні і екологічно значимі за своїм токсично-біологічним ефектом. Пестициди застосовують для захисту рослин від різних шкідників і хвороб. Залежно від об'єкта дії і хімічної природи пестициди поділяють на гербіциди, інсектициди, зооциди, фунгіциди, бактерициди, дефоліанти тощо.

Гербіциди застосовують для знищення бур'янів. В практиці використовують гербіциди суцільної дії або ті, що впливають на певну групу бур'янів. Інсектициди використовують для знищення шкідливих комах. Зооциди застосовують для боротьби з гризунами. Фунгіциди призначені для боротьби із збудниками грибкових захворювань рослин, а бактерициди – для боротьби зі збудниками бактеріальних захворювань рослин.

На певні види пестицидів встановлено норми гранично допустимого вмісту (ГДВ), які наведено в табл. 4.3.

**Таблиця 4.3 – Норми гранично допустимого вмісту пестицидів**

Речовина	ГДВ, мг/кг ґрунту
Гексахлоран технічний	1,00
ДДТ	0,5
Карбарил	0,05
Хлорофос	0,5
Карбофос	2,0
Ліндон	1,0
Поліхлоркамфен	0,5
Прометрін	0,5
Хлораліт	0,05

Принципи нормування шкідливих речовин в ґрунті відрізняються від принципів нормування в атмосфері або гідросфері. Під час нормування шкідливих речовин в ґрунті враховується не тільки та небезпека у разі безпосереднього контакту з ґрунтом, але й наслідки вторинного забруднення контактуючих з ґрунтом середовищ (повітря, вода).

Токсична дія пестицидів визначається дозою речовини, що виражена в міліграмах на кілограм маси тварини або на літр і кубічний метр повітря. Для оцінювання токсичності пестицидів прийнято середню смертельну дозу (ЛД<sub>50</sub>), яка викликає смерть 50 % піддослідних тварин у разі споживання препарату.

Залежно від цього показника пестициди поділяють на:

- сильнодійні – ЛД<sub>50</sub> до 50 мг/кг;
- високотоксичні – ЛД<sub>50</sub> до 50...200 мг/кг;
- середньотоксичні – ЛД<sub>50</sub> до 200...1000 мг/кг;
- малотоксичні – ЛД<sub>50</sub> до 1000 мг/кг.

Необґрунтоване використання пестицидів негативно впливає на якість ґрунтів. Вони дають різкий негативний результат щодо кількості і активності ґрунтової фауни і мікроорганізмів.

#### 4.3 Оцінювання якості ґрунтів та прогнозування їх стану

Достовірне оцінювання якості ґрунтів та прогнозування їх стану з можливістю управління цим процесом ґрунтується на глибокому вивченні закономірностей формування їх теплового, водного та сольового режимів. Рішення цієї проблеми базується на кількісній характеристиці детермінованих або стохастичних процесів.

Домінуючим фактором формування ґрунтів та процесів, що сприяють поліпшенню їх якості, є теплоенергетичні ресурси клімату та процесу теплового обміну. Відповідно до закону збереження енергії стосовно процесу теплообміну між літосферою та атмосферою **рівняння теплоенергетичного балансу ділянки землі** згідно зі схемою теплообміну, яка запропонована В. С. Мезенцевим, може бути подано у вигляді

$$B_K + B_A + P^+ + B_1 + LC \pm lh_T = LZ + B_0 + P^- + lh_C + B_2, \quad (4.1)$$

де  $B_K$ ,  $B_0$ ,  $B_A$  – відповідно поглинена радіація, довгохвильове випромінювання земної поверхні та поглинена нею частина противипромінювання атмосфери;

$P^+$ ,  $P^-$  – відповідно турбулентний теплообмін, направлений до літосфери і в атмосферу;

$B_1$ ,  $B_2$  – теплообмін в активному шарі ґрунтів, що має двознаковий добовий та річний хід;

$LC$  – теплота, що виділяється під час конденсації водяних парів;

$LZ$  – затрати теплоти на процес сумарного випаровування;

$L$  – прихована теплота пароутворення;

$lh_{\Gamma}$  – виділення або затрати теплоти через замерзання ґрунтової вологи або її розмерзання;

$lh_C$  – затрати теплоти на танення снігу в весняний період.

Аналітичний вираз закону збереження й перетворення енергії стосовно теплоенергетичних ресурсів клімату описується рівнянням

$$LZ_K = LZ + E_{\text{сф}} - P + l(h_C \pm h_{\Gamma}), \quad (4.2)$$

де  $Z_K$  – водний еквівалент теплоенергетичних ресурсів клімату;

$E_{\text{сф}} = B_0 - B_A$  – ефективне випромінювання.

Величина теплоенергетичних ресурсів процесу сумарного випаровування описується рівнянням

$$LZ_m = R^+ + P + B_1 - B_2 + l(h_C \pm h_{\Gamma}), \quad (4.3)$$

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

$R^+ = B_K - E_{\text{сф}}$  – радіаційний баланс земної поверхні.

Баланс прибуткових та витратних теплоенергетичних затрат сумарного випаровування описується рівнянням

$$LZ_m = LZ + T, \quad (4.4)$$

де  $T = (E_{\text{сф}} + P - LC)$  – затрати теплоенергетичних ресурсів на сумарний теплообмін.

В рівнянні теплоенергетичного балансу (4.4) сумарне випаровування та теплообмін характеризуються теоретичними межами

$$0 \leq Z \leq Z_m, \quad 0 \leq T \leq LZ_m. \quad (4.5)$$

**Водний баланс ділянки літосфери** є математичним виразом закону збереження й перетворення речовин в процесі вологообміну між компонентами географічної оболонки та встановлює в кількісній формі зв'язок між прибутковими й витратними характеристиками цього процесу. За розрахунковий інтервал часу для одиначної ділянки літосфери від денної поверхні до водоупору (рис. 4.1) вологообмін можна подати у вигляді рівняння водного балансу

$$KX + C + (W_1 - W_2) + (Q_1 - Q_2) = Z + (Y_2 - Y_1) + (G_2 - G_1) + (S_2 - S_1) + (P_2 - P_1), \quad (4.6)$$

де  $KX$  – сума атмосферних опадів  $X$ , що виправлена на недоврахування опадомірними приладами коефіцієнтом  $K$ ;

$C$  – кількість вологи, яка конденсується на елементах земної поверхні та верхньому шарі ґрунту;

$W_1, W_2$  – запаси вологи в шарі ґрунту  $h_p$  на початок й кінець розрахункового проміжку часу, відповідно;



де  $\beta_z, \delta_z, \beta_y, \delta_y, \beta_H, \delta_H, \beta_T, \delta_T$  – відносні сумарні випаровування ( $Z$ ), стік ( $Y$ ), сумарне зволоження ( $KX+W_1-W_2$ ) та сумарний теплообмін ( $T$ ) відповідно до водних еквівалентів сумарного випаровування ( $Z_m$ ) та клімату ( $Z_K$ ).

Інтегрування рівнянь (4.7) та (4.8) в загальному вигляді після відповідної підстановки дозволяє отримати часткові рівняння зв'язку

$$\beta_z = (1 + \beta_H^{-n})^{-1/n}, \quad (4.9)$$

$$\delta_z = \delta_H (1 + \ell^{an} \delta_H^n)^{-1/n}, \quad (4.10)$$

де  $n$  - параметр, числові значення якого залежать від відношення сумарного випаровування та зволоження в оптимальних умовах і фізико-географічних умов формування стоку на ділянці літосфери;

$a$  – параметр, що характеризує можливу верхню границю затрат теплоенергетичних ресурсів клімату на процес випаровування.

Значення параметра  $n$  знаходяться в межах 1,0...3,0; а параметр  $a=0...0,3$ .

**Грунт є трифазною системою**, до складу якої входять тверда, рідка й газоподібна частина. Тверда частина ґрунту й волога знаходяться в постійній взаємодії, що обумовлено силами різної природи й величини. Результати цієї взаємодії характеризують основні водні властивості ґрунтів: здатність утримувати воду різних категорій й форм (вологоемність), здатність поглинати воду й пропускати її (водопроникність) та здатність віддавати частину води шляхом вільного стікання (водовіддача).

Важливою агрогідрологічною характеристикою ґрунтів є їх вологоемність – властивість ґрунтів вміщувати або утримувати певну кількість води в порах. За характером зв'язку води з твердим середовищем розрізняють такі вологоемності:

- максимальна адсорбційна вологоемність – найбільша кількість води, яку ґрунт може міцно зв'язати внаслідок явища адсорбції;

- максимальна гігроскопічна вологоемність – найбільша кількість пароподібної вологи, яку повітряно-сухий ґрунт може поглинути із повітря, дорівнює 94 %;

- найменша вологоемність – найбільша кількість підвішеної води незалежно від механізму утримання вологи, яка може утримуватися в верхній частині товщі ґрунту після вільного стікання води, за глибокого залягання підземних вод. Величина найменшої вологоемності визначається механічним складом ґрунтів. В пісках її величина дорівнює 3...5 %, в супісках – 10...15 %, в суглинках та глинах – 15...30 %;

- капілярна вологоемність – кількість вологи в ґрунті, що утримується капілярними силами на певній відстані від рівня ґрунтових вод. Величина її змінна і залежить від висоти розміщення цього шару ґрунту над дзеркалом підземних вод;

- максимальна капілярна вологоемність – найбільша кількість води, яка утримується в ґрунті капілярними силами над дзеркалом підземних вод;

- повна вологоємність – найбільша кількість води, яка може вміститися в ґрунті за умови повного заповнення всіх пор і пор, за винятком зайнятих стиснутим повітрям.

Існує взаємозв'язок балансових елементів з водофізичними властивостями ґрунтів, який в диференціальній формі апроксимується рівнянням

$$d\beta_z = r V^{r-1} (1 - \beta_z^n)^{(n+1)/n} dV, \quad (4.11)$$

де  $V$  – відносна вологість ґрунтів, виражена їх агрогідрологічною константою найменшою вологоємністю;

$r$  – параметр, який характеризує водофізичні властивості ґрунтів та знаходиться в межах 1,1...3,0; меншими значеннями характеризуються піщані, а більшими – глинисті ґрунти.

За результатами інтегрування рівняння (4.11) отримують залежність

$$\beta_z = (1 + V^{-rn})^{-1/n}. \quad (4.12)$$

Величина найменшої вологоємності метрового шару ґрунтів в залежності від механічного складу змінюється в таких межах: глинисті та суглинисті 300...400 мм, легкосуглинисті 200...300 мм, супіщані 100...200 мм, піщані 60...100 мм.

Результати чисельного за залежністю (4.12) й картографічного моделювання дозволяють оцінити якість водного режиму ґрунтів та прогнозувати їх стан при зміні надходжень ресурсів тепла й вологи до літосфери. Характеристика середньої за рік багаторічної вологості метрового шару ґрунту як частки найменшої вологоємності в природних умовах без суттєвого впливу антропогенних факторів наведена на рис. 4.2.

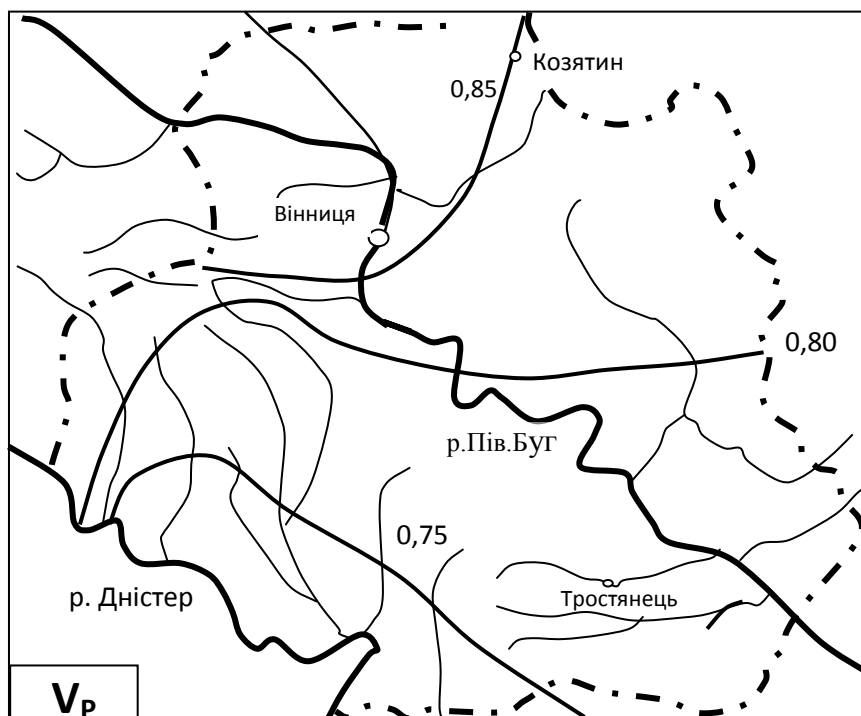


Рисунок 4.2 – Середня за рік багаторічна вологість ґрунту як частка найменшої вологоємності

Значення середньої багаторічної місячної вологості метрового шару ґрунту як частки від найменшої вологості для деяких пунктів Вінницької області наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Середня місячна вологість метрового шару ґрунту як частки від найменшої вологості

Пункт	Місяці							
	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад
Вінниця	1,08	0,93	0,84	0,76	0,72	0,70	0,73	0,81
Гайсин	1,13	0,98	0,79	0,69	0,62	0,59	0,63	0,76
Жмеринка	1,06	0,93	0,80	0,71	0,66	0,65	0,68	0,77
Козятин	1,16	1,00	0,83	0,74	0,69	0,66	0,70	0,80
Крижопіль	1,08	0,93	0,81	0,72	0,64	0,61	0,64	0,73
Липовець	1,13	0,98	0,83	0,72	0,67	0,65	0,69	0,78
Хмільник	1,14	0,99	0,84	0,75	0,71	0,69	0,73	0,82
Уладівка	1,16	1,01	0,85	0,77	0,73	0,70	0,72	0,82

Оцінювання якості ґрунтів та прогнозування їх стану за сольовим режимом є складною задачею. Для випадку, коли солі рухаються лінійно вздовж осі  $x$  з постійною швидкістю фільтрації ( $V_0 = \text{const}$ ) та за незалежності інтенсивності розчинення солей, що в твердій фазі ґрунту, від їх об'єму та поверхні рівняння руху солей має вигляд

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - V_B \frac{\partial n}{\partial x} + \beta(n_m - n), \quad (4.13)$$

де  $n$  – концентрація ґрунтового розчину;

$t$  – час;

$x$  – відстань;

$V_B$  – фактична швидкість руху води в порах ґрунту, що дорівнює  $V_B = V_0/m$ ;

$m$  – прозорість;

$n_m$  – гранична концентрація насичення;

$\beta$  – коефіцієнт розчинення;

$D$  – коефіцієнт фільтраційної дифузії.

Розв'язок рівняння (4.13) для різних вихідних даних дозволяє виявити характер засолення ґрунтів під впливом антропогенних факторів з метою розроблення заходів для поліпшення їх якості.

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте означення літосфери та ґрунту.
2. Охарактеризуйте фізичні та хімічні властивості ґрунтів.
3. Наведіть класифікацію ґрунтів за механічним складом.
4. Яка структура земельного фонду України?
5. Наведіть основні причини деградації та забруднення ґрунтів.
6. Поясніть суть моніторингу земель.
7. За якими інгредієнтами виконують спостереження за забрудненням ґрунтів?
8. Норми гранично допустимого вмісту пестицидів.
9. Розкрийте суть теплоенергетичного балансу клімату.
10. Наведіть рівняння водного балансу ділянки літосфери.

## **5 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЧОВИН, ЩО ЇЇ ЗАБРУДНЮЮТЬ**

### **5.1 Радіаційні процеси в атмосфері та її тепловий і вологісний режими**

Під час проектування й експлуатації систем теплогазопостачання і 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 водяної пари й льоду, оптичні та 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 пов'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 под. Залежно 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 частинку.

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.

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 до 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, спалене людством за 1000 років за нинішньої річної трати.

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.

Під час вивчення сонячної радіації, земного і атмосферного випромінювання використовують закони теплового випромінювання.

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

$$I_T / \kappa_T = \text{const} , \quad (5.1)$$

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

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

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

$$E = \sigma T^4 , \quad (5.2)$$

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

$\sigma$  – стала Стефана-Больцмана,  $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-11}$  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 % .

Під час проходження 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 послаблюється, 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

$$S = S_0 * \sin h , \quad (5.3)$$

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.

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 за середньої 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. Завдяки розсіюванню існує денна освітленість у випадку суцільних хмар та ми бачимо предмети, що знаходяться в тіні.

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

$$Q = S + D. \quad (5.4)$$

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

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

$$A = Q_v / Q. \quad (5.5)$$

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

Поглинута землею поверхнею сонячна радіація

$$Q_n = Q (1 - A). \quad (5.6)$$

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

$$J_e = J_o (1 - c n) + 4 \delta \sigma T^3 (T_n - T), \quad (5.7)$$

де  $J_o$  – ефективне випромінювання за безхмарного неба;

$n$  – середня хмарність;

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

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

$\sigma$  – стала Стефана – Больцмана;

$T$  – абсолютна температура повітря;

$T_n$  – абсолютна температура випромінювальної поверхні.

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

$$R = (S + D) (1 - A) - J_e. \quad (5.8)$$

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 землею поверхнею:

$$R = (S + D)(1 - A) + Q - E, \quad (5.9)$$

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 становить 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.

**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.

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

**Добовий хід температури** повітря визначається: широтою місця, часом року, рельєфом, характером підстилаючої поверхні, хмарністю та висотою над поверхнею ґрунту. Над сушею амплітуда добових коливань температури становить 10...15 °С. 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 °С.

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

$$\Delta t = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{H_{\text{в}} - H_{\text{н}}} \cdot 100\% , \quad (5.10)$$

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 °С/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 за будь-якого вертикального зміщення повітряної маси всередині цього шару

виникають сили, що перешкоджають цьому зміщенню і повертають цю зміщену масу повітря на її попередній рівень.

**Рівень конвекції** – це висота, на якій висхідні рухи повітря припиняються. Рівень конвекції залежить від початкової різниці температур і від вертикального градієнта температури. За великих значень 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 під час охолодження земної поверхні внаслідок нічного випромінювання. Взимку інверсійні приземні шари можуть досягати висоти сотень метрів.

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

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

**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 ( $e$ ). У разі збільшення пружності пари в повітрі досягається її критичне значення, що відповідає стану рівноваги (насичення). Стан насичення характеризується максимальною пружністю ( $E$ ) водяної пари за певної температури  $t$ , величина якої обчислюється за емпіричною формулою, гПа:

$$E = 6,1 \cdot 10^{7,63 t / (242+t)} . \quad (5.11)$$

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

$$C = c v (E - e), \quad (5.12)$$

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:

$$Z = Z_m \left[ 1 - \left( \frac{X + W_1 - W_2}{Z_m} \right)^{-n} \right]^{-\frac{1}{n}}, \quad (5.13)$$

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 підстильної 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,  $г/м^3$

$$a = 217 e / T, \quad (5.14)$$

де  $e$  – пружність пари, Па;

$T$  – температура повітря, К.

Відносна вологість – це відношення пружності пари до максимальної пружності водяної пари за певної температури, %

$$\varphi = e / E * 100. \quad (5.15)$$

Дефіцит вологості визначається за формулою, Па:

$$\Delta e = E - e. \quad (5.16)$$

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

$$d = 622 e / (P - e), \quad (5.17)$$

де  $P$  – маса вологого повітря, кг.

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

$$\Delta t = t - t_p. \quad (5.18)$$

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.

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

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

Хмари утворюються внаслідок адіабатичного охолодження, тобто виділення прихованої теплоти конденсації чи сублімації, конвективно піднятого повітря або охолодження його радіацією.

Відносна вологість в середньому за рік по всій Україні становить 63...70 %, а в горах – 73...75 %. Влітку середні місячні величини відносної вологості на рівнинних територіях становлять 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 становлять близько 80 %. В середньому за рік величини випаровування становлять 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. Мінімальних значень парціальний тиск (3,7...4,7 гПа) набуває в холодні місяці року. Найбільше значення парціального тиску водяної пари (15...16 гПа) спостерігається в липні. Величина річного парціального тиску в середньому по області становить 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 становлять 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.

## 5.2 Атмосферний тиск та рух повітря

Атмосферний тиск – вага стовпа атмосферного повітря з площею основи  $1\text{ м}^2$ , що знаходиться над нею і тягнеться до верхньої межі атмосфери. Атмосферний тиск в певному 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  $1 \text{ м}^2$  за температури  $0^\circ\text{C}$  на рівні моря і на широті  $45^\circ$ .

Одиницею виміру тиску є паскаль (Па) та гектопаскаль (гПа). Нормальний тиск атмосфери становить 1013 гПа.

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

$$H_2 - H_1 = 18400 \cdot (1 + \alpha \cdot t)(1 + 0,378 \frac{e}{p})(1 + 0,0026 \cos 2\varphi)(1 + \beta_2) \log \frac{p}{p_2}, \quad (5.19)$$

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

$$h = \Delta H / \Delta p. \quad (5.20)$$

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

Вертикальний баричний градієнт – це величина, обернена до баричного ступеня і означає зміну тиску під час переміщення на одиницю висоти, гПа/100 м.

$$G_B = - \frac{dp}{dz} = \frac{gp}{RT}, \quad (5.21)$$

де  $R$  – газова стала ( $8,314 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг К}$ )

$T$  – температура, К;

$G$  – гравітаційна стала ( $9,806 \text{ м/с}^2$ ).

Відповідно до формули (5.21) 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

$$G_T = - \Delta P / \Delta r, \quad (5.22)$$

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 змінюється неперіодично та не має правильного ходу. Зміни тиску обумовлено термічними й динамічними причинами. Територія України характеризується континентальним типом річного ходу тиску з мінімумом влітку та максимумом взимку. За підвищеного тиску спостерігається невелика хмарність. Зниження тиску є причиною посилення вітру, збільшення хмарності та коливань температури й вологості повітря.

Загалом за рік над Україною баричне поле являє собою сідловину. Середній річний атмосферний тиск в Вінницькій області становить 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 конвекції. Зимом мінімум утворюється о 4...6 год. та о 16...20 год.

**Внаслідок** нерівномірності розподілу атмосферного тиску в різних місцях Земної кулі відбувається переміщення повітря із областей з високим тиском в області з низьким тиском. Через ці переміщення виникає вітер, тобто горизонтальний рух повітря відносно земної поверхні. Рух відбувається до тих пір, поки тиск в горизонтальному напрямку не вирівняється.

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. 5.1).

Таблиця 5.1 – 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 земною поверхнею. У річному ході поривчастість зростає на весну, є значною літом і спадає взимку.

**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.

**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.

**Місцевими** вітрами називають повітряні течії, 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.

**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.

**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.

### 5.3 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 за відсутності зовнішніх сил описується першим законом Фіка:

$$I_{i(x)} = -D_i \frac{dC_i}{dx}, \quad (5.23)$$

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**

$$D = V \lambda / 3, \quad (5.24)$$

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

$$\frac{dC}{dt} = D \left( \frac{d^2 C}{dx^2} + \frac{d^2 C}{dy^2} + \frac{d^2 C}{dz^2} \right), \quad (5.25)$$

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

$$\frac{dC}{dt} + \frac{\partial(CV_a)}{\partial x} - \left( \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \epsilon_a, \quad (5.26)$$

де  $C$  – об'ємна концентрація домішок, що дорівнює

$$C = a \rho, \quad (5.27)$$

$a$  – 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 (5.26) можливе за відомих початкових і граничних умов та є надзвичайно складною задачею.

#### **5.4 Забруднювальні речовини, їх типи та властивості пилу й газів**

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);
- поширення (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 дорівнює або перевищує границю низьких викидів для цієї 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 поширення забруднювальних речовин яких не накладаються один на одного в межах половини завітряної або єдиної циркуляційної зони чи в межах міжкорпусної циркуляційної зони.

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

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

Класифікацію атмосферних забруднень газових викидів за розмірами наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – 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 за його неповного згорання
Аерозолі	Будь-які суспензії в повітрі, що відносно стабільні
Смог	Назва будь-якого небажаного забруднення атмосфери (густий туман з пилом та шкідливим газом)

Для вибору відповідного обладнання й технології очищення газових викидів від пилу необхідно знати фізико-хімічні властивості пилу, початкову концентрацію пилу та ефективність очищення. Домінантними у цьому випадку є параметри золи та 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. У разі злежування насипна густина збільшується в 1,2...1,5 рази. Уявна густина є відношенням маси частинок до об'єму, який вона займає, включно пори, пустоти 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 певного розміру з вказанням, яку частку у відсотках від маси або кількості частинок вони становлять. Дисперсність пилу характеризується параметрами:  $d_{50}$ , що дає середній розмір частинок;  $I_g \sigma$  – ступінь полідисперсності пилу. Дисперсний склад пилу, що утворюється під час деяких технологічних процесів, наведено в таблиці 5.3, а його класифікацію за дисперсністю – в таблиці 5.4.

Таблиця 5.3 – Дисперсний склад пилу, що утворюється під час деяких технологічних процесів

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

Таблиця 5.4 – 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
У	дуже дрібнодисперсний	< 1

**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, поводитья як злиплий. Класифікацію пилу за злипанням наведено в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – 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 за шарового спалювання, з недопаленням більше 30 % кам'яного вугілля, коксовий пил, сланцева зола, магнезитовий 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, каоліну, мучнистий пил, волокнистий, азбестовий, бавовняний та шерстяний пил	$P > 600$

**Сипучість** – кут природного скосу, що його набуває пил в свіжонасипному вигляді.

**Абразивність** частинок характеризує інтенсивність зношування металу за однакових швидкостей газів й концентрацій пилу. Величина абразивності залежить від твердості, форми, розміру й густини частинок. Максимальне зношування металів буде за розмірів  $90 \pm 2$  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. Класифікацію твердих тіл за характером змочування наведено в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – 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

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

**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. Класифікацію пилу за питомим електричним опором наведено в табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – 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 ізолювальний шар, великі труднощі під час вловлювання

**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 пиловловлювальних 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 самозапалення мають пили органічних речовин, що утворюються під час виготовлення барвників, пластмас й волокон, а також пил таких металів, як магнію, алюмінію й цинку.

Мінімальні вибухонебезпечні концентрації завислого в повітрі пилу становлять 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.

Гази характеризуються такими основними параметрами, як молекулярна маса, густина, в'язкість, вологість, питома теплоємність та ентальпія. Основні фізичні властивості деяких газів наведено в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – **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 °С. Вона залежить від тиску і об'єму.

**Ентальпія газів** – кількість теплоти, яку необхідно підвести до 1 кг газу за постійного тиску, щоб довести його температуру від 0 °С до заданого значення температури.

Значна частка шкідливих викидів в атмосферу формується під час спалювання твердого та рідкого палива й газу котельнями й теплоелектроцентралями. 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 у разі неповного спалювання всіх видів палива. Погано розчиняється у воді і не поглинається активованим вугіллем.

**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.

За концентрації до 3 мг/м<sup>3</sup> запах не відчувається, а за концентрації 10 мг/м<sup>3</sup> відчувається слабкий запах, який стає відчутним за концентрації більше 15 мг/м<sup>3</sup>, що викликає подразнення очей.

Якщо в повітрі міститься значна кількість оксидів вуглецю й оксидів азоту, то під дією сонячної радіації утворюється токсичний туман. Цей туман зменшує прозорість атмосфери, 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 за концентрації 0,006 мг/л. За 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, 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. У випадку менших концентрацій спостерігається подразнення очей та органів дихання. Людина починає відчувати наявність сірководню в повітрі за концентрації близько 0,002 мг/л.

Найбільш поширеним й сильнотоксичним канцерогеном є 3,4-бензпірен (C<sub>2</sub>H<sub>12</sub>) 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 під час неповного спалювання палива, та вихлопні газів двигунів автомобільного транспорту.

3,4-бензпірен – це речовина, що викликає онкологічні захворювання легенів та інших органів.

## 5.5 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 близько 2 млн людей. Більше 20 тис. населення проживає на території, де радіаційне забруднення лише нуклідами цезію перевищує  $40 \text{ Кі/км}^2$ .

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

$$T_{cp} = 1/\lambda = 1,44 T_{1/2}. \quad (5.28)$$

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 (Кі), що використовується як позасистемна, відповідає  $3,7 \cdot 10^{10}$  розпадів в секунду в одному грамі радію.

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

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

Поглинена доза випромінювання – це енергія випромінювання, поглинена одиницею маси речовини протягом часу випромінювання. За одиницю поглиненої дози випромінювання прийнято грей (Гр) – поглинену дозу іонізуючого випромінювання, за якої 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 взято кулон на кілограм (Кл/кг) – експозиційна доза рентгенівського й гамма-випромінювання, за якої сполучена корпускулярна емісія в сухому атмосферному повітрі масою 1 кг створює іони, які несуть електричний заряд кожного знаку, що дорівнює 1 Кл.

Зіверт – поглинена доза будь-якого виду іонізуючого випромінювання, яка має таку 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 становить 4,88 мЗв/рік, із них 3,8 мЗв/рік припадає 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

$$A_{\text{еф}} = A_{\text{Ra}} + 1,31 A_{\text{Th}} + 0,085 A_{\text{K}}, \quad (5.29)$$

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 відносно радію 226.

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

Середньорічна ефективна доза опромінення населення України від джерел природної радіоактивності становить 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 рази 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 ексхалляції через захисні конструкції будівель в процесі радіоактивного розпаду радію-226 описується рівнянням

$$C_o(t) = \left[ \left( \frac{\sum q_i S_i}{W(\lambda_o - \lambda_v)} + \frac{C_o^a \lambda_v}{\lambda_o - \lambda_v} \right) \{1 - \exp[-(\lambda_o + \lambda_v)t]\} + C_o(0) \exp[-(\lambda_o + \lambda_v)t] \right] \quad (5.30)$$

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;

$\lambda_0$  – стала розпаду радону-222;

$\lambda_v$  – кратність повітрообміну в приміщенні;

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

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

$t$  – час надходження радіонуклідів радону-222.

Залежно 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  $\lambda_v = \lambda_0 + W$ , оскільки в процесі одного обміну за годину  $\lambda_0 = 2,78 \cdot 10^{-4}$  С<sup>-1</sup>, об'ємна активність радону в приміщенні становить

$$C_o = \frac{q S}{W \lambda_v} + C_o^a. \quad (5.31)$$

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

$$C(t) = \frac{C_n (W + (q_r + q_v) t_o) q_r (t - t_o)}{W + (q_r + q_v) t_o}, \quad (5.32)$$

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;

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

Аналіз рівняння (5.32) 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 відноситься  $\beta$ -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.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

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.
8. Дайте характеристику джерел забруднення.
9. Наведіть класифікацію атмосферних забруднень газових викидів.
10. Охарактеризуйте основні властивості пилу.
11. Як класифікують пил за злипанням.
12. Назвіть групи пилу за питомим електричним опором.
13. Поясніть основні властивості шкідливих газових викидів.
14. Наведіть параметри радіоактивних забруднювачів.

## 6 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ПИЛУ

### 6.1 Загальні відомості про фізичні основи технології очищення газів від пилу

Технологічні процеси очищення газових викидів ґрунтуються на фізичних та хімічних властивостях забруднювачів і використанні основних фізичних закономірностей, внаслідок яких відбувається пиловловлювання.

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.

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

Осадження під дією відцентрової сили відбувається за криволінійного руху 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, яка 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. Внаслідок цієї взаємодії відбувається осадження частинок на поверхні обтічних тіл або стінок пиловловлювача. 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.

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

**Фотофорез** – це рух частинок аерозолі, освітлених з однієї сторони. Характер цього явища визначається розподіленням температур в освітлюваній частинці, яке залежить від форми і розміру частинок, прозорості та показника заломлення матеріалу. Якщо сторона, що звернена до світла, гарячіша, ніж протилежна, 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 під час осадження частинок певного типу. Під час проєктування технологічних процесів і конструювання газоочисного обладнання необхідно насамперед визначити тип речовини, що видаляється з газового потоку, її об'єм та параметри.

## 6.2 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 в процесі проходження їх через газоочисний апарат. Під час падіння частинка пилу зазнає опору середовища. Якщо знехтувати турбулентністю потоку та конвекційними течіями, то сила опору, що діє на частинку під час її руху, можна визначити з рівняння

$$F = \xi S_{\text{ч}} \rho_{\text{г}} V_{\text{ч}}^2 / 2, \quad (6.1)$$

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

$$R_e = V_{\text{ч}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{г}} / \mu_{\text{г}}, \quad (6.2)$$

де  $S_{\text{ч}}$  – площа перерізу частинки, перпендикулярного до 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. 6.1).

Таблиця 6.1 – Значення коефіцієнтів опору середовища від режиму руху частинок

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

У випадку кульової форми частинки критерій Рейнольдса

$$R = V_{\text{ч}} d_{\text{ч}} \rho_{\text{г}} / \mu_{\text{г}}, \quad (6.3)$$

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

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

За ламінарного режиму руху частинок сферичної форми опір середовища відповідно до закону Стокса становить

$$F = 3 \pi d_{\text{ч}} \mu_{\text{г}} V_{\text{ч}}. \quad (6.4)$$

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

Тоді опір середовища руху частинки буде

$$F = 3 \pi d_{\text{ч}} \mu_{\text{г}} V_{\text{г}} / C_{\text{к}}, \quad (6.5)$$

де  $C_{\text{к}}$  – поправка за підвищену рухомість частинок, значення якої для повітря за нормальних умов наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – 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

За відсутності опору середовища швидкість руху частинки під дією сили ваги буде змінюватися залежно від часу, тобто за законом

$$V_{\text{ч}} = g_{\text{ч}} \tau_{\text{ч}}, \quad (6.6)$$

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

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

З огляду на збільшення швидкості частинки ( $V_{\text{ч}}$ ) буде зростати величина опору середовища ( $F$ ) і відповідно буде зменшуватися прискорення частинки ( $g_{\text{ч}}$ ). Внаслідок такого співвідношення сил частинка буде рухатися з постійною швидкістю. Величина цієї сталої швидкості визначається з рівності сили ваги й сили опору середовища

$$3 \pi d_{\text{ч}} \mu_{\text{г}} \omega_{\text{в}} = (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) g_{\text{ч}} \pi d^3 / 6, \quad (6.7)$$

де  $\omega_{\text{в}}$  – швидкість витання (осадження) частинки, яка визначається із співвідношення (6.8)

$$\omega_{\text{в}} = g_{\text{ч}} d_{\text{ч}}^2 (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}}) / 18 \mu_{\text{г}} = g_{\text{ч}} \tau_{\text{р}}, \quad (6.8)$$

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

Швидкість осадження (витання) частинки визначається з рівності опору середовища та сили ваги (6.8).

Діаграму для визначення швидкості осадження частинок наведено на рис. 6.1.

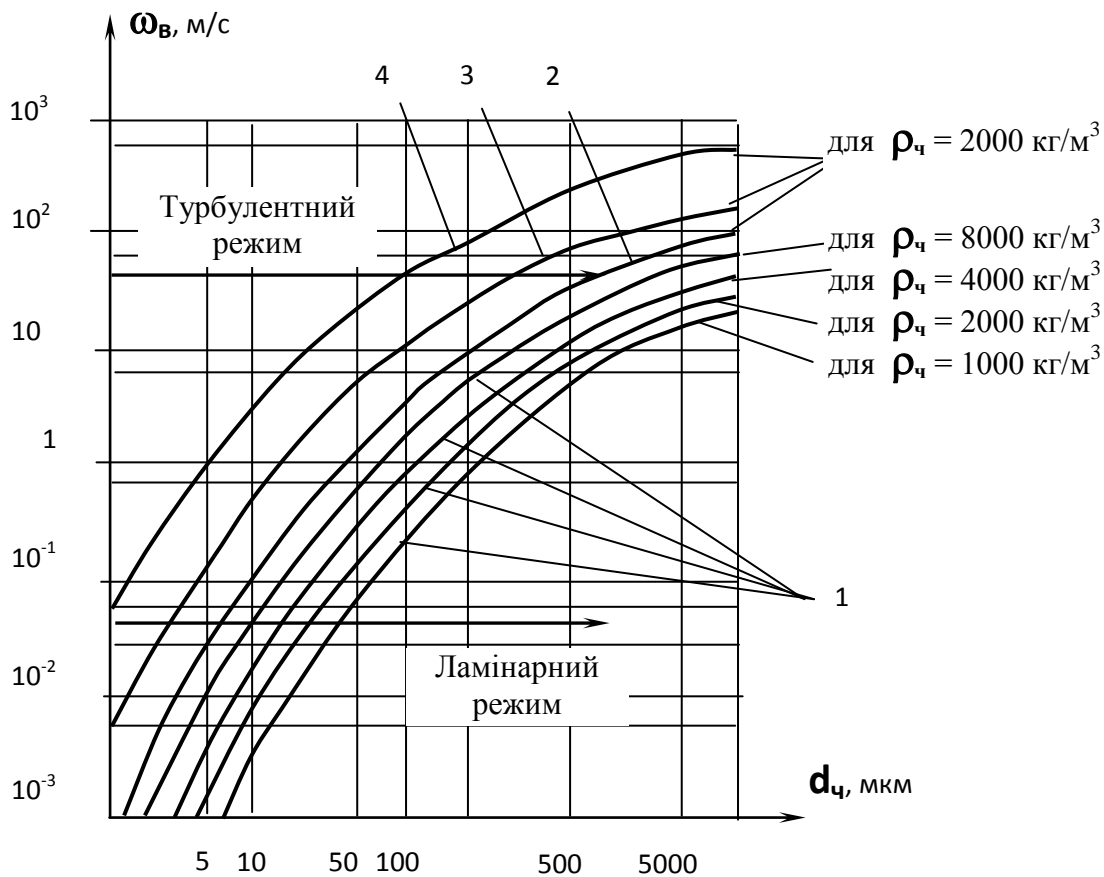


Рисунок 6.1 – Діаграма для визначення швидкості осадження частинок в повітрі: 1 – під дією сили ваги; 2,3,4 – під дією сили, що перевищує силу ваги в 10, 100 та 1000 разів

### 6.3 Інерційне осадження частинок

Інерційне осадження частинок застосовують для грубого очищення газових викидів від запилених 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 запиленим потоком частинки, внаслідок великої інерції, продовжують рухатися поперек зігнутих лінії течії газів й осаджуються на поверхні тіла (рис. 6.2).

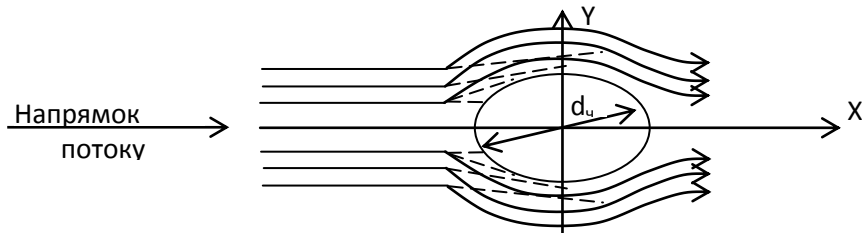


Рисунок 6.2 – Інерційне осадження частинок на кулі:  
 ——— рух газів; - - - рух частинок

Коефіцієнт ефективності інерційного осадження визначається часткою частинок, видалених з потоку під час обтікання ними тіла.

Траєкторія руху частинок в газовому потоці описується рівнянням:

$$\rho_{\text{ч}} W_{\text{ч}} \frac{d\bar{w}_{\text{ч}}}{d\tau} = \rho_{\text{г}} V_{\text{г}} \frac{d\bar{V}_{\text{г}}}{dt} + F_{\text{с}}, \quad (6.9)$$

де  $W_{\text{ч}}$  – об'єм частинки,  $\text{м}^3$ ;

$\tau$  – час руху, с;

$\rho_{\text{ч}}$  – густина частинки,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\bar{w}_{\text{ч}}$ ,  $\bar{V}_{\text{г}}$  – вектор швидкості відповідно частинки та газів в місці знаходження частинки,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$F_{\text{с}}$  – 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:

$$S_{\text{тк}} = d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}} V_{\text{г}} C_{\text{к}} / 18 \mu_{\text{г}} 2 R, \quad (6.10)$$

де  $\mu_{\text{г}}$  – динамічна в'язкість газу,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;

$R$  – 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 дорівнює відношенню відстані, що проходила частинка з початковою швидкістю  $V_{\text{г}}$  за 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

$$l_{\text{ч}} = d_{\text{ч}}^2 V_{\text{г}} \rho_{\text{ч}} / 18 \mu_{\text{г}}. \quad (6.11)$$

За стаціонарного руху газового потоку, коли частинки настільки малі, що для інерційної сили, яка діє на частинку, можна застосувати закон Стокса, рівняння (6.9) можна подати в вигляді

$$2S_{\text{tk}} \frac{d^2 \bar{\rho}}{d\tau_0^2} + \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau_0} = \omega_0, \quad (6.12)$$

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

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

$\tau_0$  – безрозмірний час, що дорівнює

$$\tau_0 = \omega_{0\delta} \tau / \mathbf{R}. \quad (6.13)$$

Якщо частинка рухається на ділянці, де закон Стокса не можна застосувати, то в рівняння (6.12) вводиться поправка, яка враховує відношення дійсної сили опору до стоксівського опору,

$$\frac{48 S_{\text{tk}}}{\xi_q \mathbf{R}_{\text{eq}}} \frac{d^2 \bar{\rho}}{d\tau_0^2} + \frac{d\bar{\rho}}{d\tau} = \bar{\omega}_0, \quad (6.14)$$

де  $\xi_q$  – коефіцієнт, що залежить від критерію Рейнольдса для частинки ( $\mathbf{R}_{\text{eq}}$ ),

$$\mathbf{R}_{\text{eq}} = d_q \rho_q (\omega_q - \mathbf{V}_r) / \mu_r. \quad (6.15)$$

Аналіз рівняння (6.14) свідчить, що за  $S_{\text{tk}} = 0$ , коли частинки мають безмежно малу масу,

$$\bar{\omega}_0 = d\bar{\rho} / d\tau_0. \quad (6.16)$$

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

За певного мінімального значення 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. 6.2), можна дослідити вплив режиму руху газового потоку на інерційне осадження. За ламінарної течії потоку ( $\mathbf{R}_e < 2$ ) ефективність інерційного осадження не залежить від критерію Рейнольдса поки можна не враховувати існування прилеглого до обтічного тіла шару потоку (в'язке обтікання).

Під час переходу до турбулентного руху потоку, що характеризується збільшенням значень критерію  $\mathbf{R}_e$ , на поверхні обтічного

тіла утворюється прилеглий шар, товщина якого зменшується із збільшенням критерію  $R_e$ .

Якщо значення критерію Рейнольдса  $R_e > 500$ , то лінії течії сильніше вигинаються (потенційне обтікання) і обтікають тіло на близькій відстані від нього. Як результат – ефективність інерційного осадження частинок буде вищою.

#### 6.4 Відцентрове осадження частинок

Відцентрове осадження частинок застосовують для очищення запиленого повітря з температурою до  $500\text{ }^\circ\text{C}$  від частинок розміром більше  $5\text{ }\mu\text{m}$  за швидкості руху газів  $2\text{...}5\text{ м/с}$ .

Найбільше поширення для очищення 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, подано на рис. 6.3.

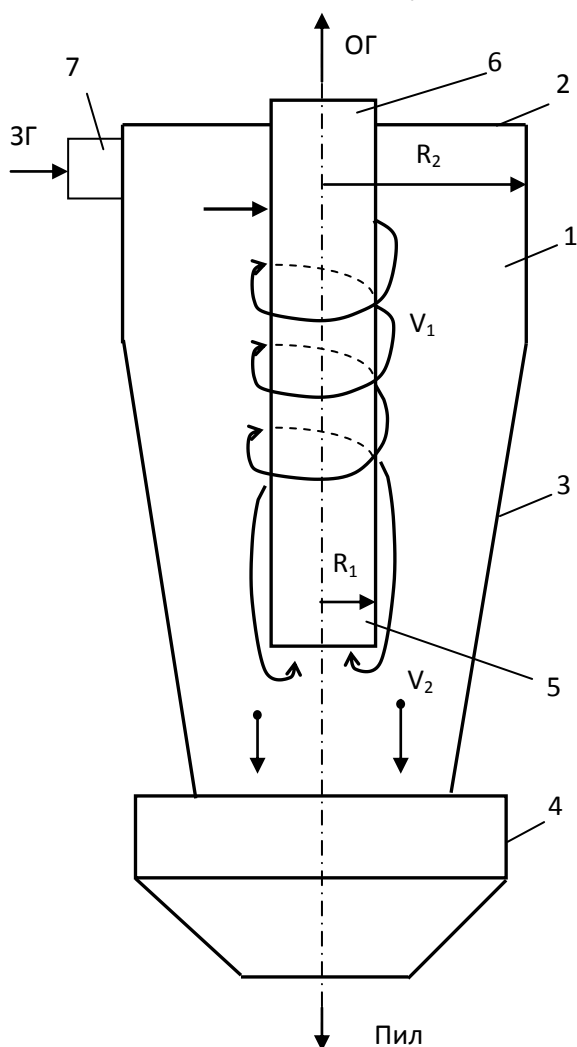


Рисунок 6.3 – Циклон:

- 1 – циліндрична обечайка корпусу;
- 2 – кришка обечайки;
- 3 – конус корпусу;
- 4 – пилосбірник;
- 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, внаслідок 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 циклону. Завдяки цьому основна маса пиловатих частинок зосереджується в течії газу, що рухається безпосередньо біля стінок апарата. Цей потік направляється в

нижню конічну частину корпусу 3. Частинки пилу потрапляють в пилозбірник 4. Очищений газ після виконання крутого розвороту по центральній трубі 5 виводиться з апарата.

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

Під час роботи 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,

$$P_{\text{ц}} = (m \omega_{\text{т}}^2) / R, \quad (6.17)$$

сила опору руху частинки в радіальному напрямку

$$P_{\text{R}} = 3 \pi \omega_{\text{R}} d_{\text{ч}} \mu, \quad (6.18)$$

сила ваги частинки

$$P_{\text{g}} = m g, \quad (6.19)$$

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

$$P_{\text{ц}} > P_{\text{R}}. \quad (6.20)$$

Нехтуючи силою тяжіння частинки, оскільки вона дуже мала, та використовуючи рівняння (6.17), можна записати

$$(m\omega_{\text{т}}^2)/R = 3\pi \omega_{\text{R}} d_{\text{ч}} \mu. \quad (6.21)$$

Маса кулеподібної частинки:

$$m = \pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} / 6, \quad (6.22)$$

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

Швидкість руху частинки в радіальному напрямку, якщо підставити (6.21) в рівняння (6.20), дорівнює

$$\omega_{\text{R}} = (d_{\text{ч}}^2 \omega_{\text{т}}^2 \rho_{\text{ч}}) / (18 \mu R). \quad (6.23)$$

Необхідний час осідання частинки, що має подолати відстань  $(R_2 - R_1)$ , становить

$$\tau_{\text{ос}} = (R_2 - R_1) \omega_{\text{R}} = (9\mu (R_2^2 - R_1^2)) / (d_{\text{ч}}^2 \omega_{\text{т}}^2 \rho_{\text{ч}}), \quad (6.24)$$

де  $R_1, R_2$  – відповідно радіуси центральної труби та циклона (рис. 6.3), м.

За другої умови, необхідний час осідання частинки:

$$\tau_{oc} = (2\pi R n') / \omega_r, \quad (6.25)$$

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

Із сумісного розв'язку рівнянь (6.23 та 6.24) визначають найменший діаметр частинок, які осідають в циклоні за час осідання  $\tau_{oc}$

$$d_{min} = 3 \sqrt{\frac{\mu(R_2 - R_1)}{\pi n' \rho_c \omega_r}}. \quad (6.26)$$

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

$$\eta_x = d_x^2 / d_{min}^2. \quad (6.27)$$

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

$$W_{ц} = W_r \tau_{oc}, \quad (6.28)$$

де  $W_r$  – об'єм очищеного газу, м<sup>3</sup>/с.

Для оцінення ефективності роботи циклона використовують критерій Фруда

$$F_r = \omega_r / R_g. \quad (6.29)$$

Гідравлічний опір циклона дорівнює:

$$\Delta P_{ц} = \xi (\rho_r \omega_r^2) / 2, \quad (6.30)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору циклона;

$\rho_r$  – густина газів, кг/м<sup>3</sup>.

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

## 6.5 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 під час дифузійного осадження описується рівнянням Ейнштейна

$$\Delta x^2 = 2 D_c T_r, \quad (6.31)$$

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

$D_c$  – коефіцієнт дифузії частинки, що характеризує інтенсивність броунівського руху, м<sup>2</sup>/с;

$T_r$  – абсолютна температура газу, К.

Коли розмір частинок ( $d_c$ ) більший за середній шлях пробігу молекул ( $l_i$ ), тобто  $d_c > l_i$ , коефіцієнт дифузії є функцією розміру частинок

$$D_{\text{ч}} = C_{\text{к}} K_{\text{Б}} T_{\text{Г}} / 3\pi\mu_{\text{Г}}d_{\text{ч}} , \quad (6.32)$$

де  $C_{\text{к}}$  – поправка, яка враховує підвищену рухомість частинок (див. табл. 6.2);

$K_{\text{Б}}$  – стала Больцмана, яка дорівнює  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Коли розмір частинок ( $d_{\text{ч}}$ ) менший за середній пробіг молекул ( $l_{\text{Г}}$ ), тобто  $d_{\text{ч}} < l_{\text{Г}}$ , коефіцієнт дифузії знаходиться за рівнянням Лангмюра

$$D_{\text{ч}} = \frac{4K_{\text{Б}} T_{\text{Г}}}{3\pi d_{\text{ч}}^2 P_{\text{Г}}} \sqrt{\frac{8R_{\text{Г}} T_{\text{Г}}}{\pi M_{\text{Г}}}} , \quad (6.33)$$

де  $R_{\text{Г}}$  – універсальна газова стала, дорівнює 8324 Дж/кмоль·К;

$P_{\text{Г}}$  – абсолютний тиск газів, Па;

$M_{\text{Г}}$  – маса одного кіломоля, кг/кмоль.

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

$$S_{\text{с}} = \mu_{\text{Г}} / \rho_{\text{Г}} D_{\text{ч}} = \nu_{\text{Г}} / D_{\text{ч}} , \quad (6.34)$$

де  $\nu_{\text{Г}}$  – кінематична в'язкість,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Крім критерію Шмідта  $S_{\text{с}}$  в практиці дифузійних розрахунків використовують критерій Пекле  $Re$ , що характеризує відношення конвекційних сил до дифузійних

$$Re = R_{\text{с}} S_{\text{с}} = V_{\text{Г}} l / D_{\text{ч}} , \quad (6.35)$$

де  $V_{\text{Г}}$  – швидкість газу,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$l$  – визначальний лінійний параметр обтічного тіла.

Значення коефіцієнта дифузії частинок для нормальних умов, обчислених за формулою (6.32), та значення критерію Шмідта  $S_{\text{с}}$  залежно від розмірів частинок наведено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Значення коефіцієнта дифузії та критерію Шмідта

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

Дані табл. 6.3 свідчать, що значення коефіцієнта дифузії різко збільшується із зменшенням розміру частинок. Швидкість дифузії навіть субмікронних частинок надто мала порівняно з швидкістю молекул газу.

Розрахунок дифузійного осадження частинок виконують за формулами, одержаними у розгляді процесів молекулярної дифузії.

Масову швидкість частинок ( $\text{кг}/\text{с}$ ), що дифундують на кулю, обчислюють за формулами:

а) якщо критерій Рейнольдса  $Re < 3$  і критерій Шмідта  $S_{\text{с}} = 10^6$ , то

$$w_{\text{ч}} = \pi D_{\text{ч}} d_{\text{к}} C_{\text{ч}} \text{Re}^{1/3} S_{\text{с}}^{1/3}, \quad (6.36)$$

де  $d_{\text{к}}$  – діаметр кулі, м;

$C_{\text{ч}}$  – концентрація частинок в потоці, кг/м<sup>3</sup>;

б) якщо значення критеріїв  $\text{Re} = 600 \dots 2600$  і  $S_{\text{с}} = 10^6$ , то

$$w_{\text{ч}} = 0,8 \pi D_{\text{ч}} d_{\text{к}} C_{\text{ч}} \text{Re}^{1/3} S_{\text{с}}^{1/3}; \quad (6.37)$$

в) якщо значення критеріїв  $\text{Re} = 100 \dots 700$  і  $S_{\text{с}} = 10^3$ , то

$$w_{\text{ч}} = 0,95 \pi D_{\text{ч}} d_{\text{к}} C_{\text{ч}} \text{Re}^{1/2} S_{\text{с}}^{1/3}. \quad (6.38)$$

Ефективність дифузійного осадження частинок під час обтікання газовим потоком кулі розраховують за формулою

$$\eta_{\text{D}} = 2 \sqrt{2} / (P_{\text{е}} d_{\text{к}})^{1/2}, \quad (6.39)$$

де  $P_{\text{е}}$  – критерій Пекле.

Ефективність дифузійного осадження на циліндрі обчислюють за формулами:

а) у випадку в'язкого обтікання циліндра

$$\eta_{\text{D}} = 2,92 / ((2 - \ln \text{Re})^{1/3} P_{\text{е}}^{2/3}), \quad (6.40)$$

б) у випадку потенційного осадження

$$\eta_{\text{D}} = 3,19 / P_{\text{е}}. \quad (6.41)$$

Аналіз формул (6.39 – 6.41) свідчить, що ефективність дифузійного осадження частинок обернено пропорційна розмірам частинок та швидкості газового потоку.

## 6.6 Осадження частинок за рахунок зачеплення

Важливе значення в процесі захоплення 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 дорівнює її радіусу.

Ефект зачеплення характеризується параметром

$$R = d_{\text{ч}} / d_{\text{т}}, \quad (6.42)$$

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

У випадку потенційного обтікання тіла, коли величина параметра  $R$  настільки мала, що можна знехтувати силами інерції, ефективність зачеплення становить: за обтікання кулі  $\eta_{\text{R}} = 3R$ , а за обтікання циліндра –  $\eta_{\text{R}} = 2R$ .

У випадку, коли за рахунок суттєвого значення інерційних ефектів траєкторії осідаючих частинок прямолінійні, ефективність зачеплення становить: за обтікання кулі  $\eta_R = 2R$ , а за обтікання циліндра  $\eta_R = R$ .

Таким чином, за потенційного обтікання кулі ефективність механізму зачеплення знаходиться в межах  $(2...3)R$ , а у разі потенційного обтікання циліндра –  $(1...2)R$ .

Ефективність осадження частинок за рахунок дотику під час в'язкого обтікання циліндра визначається за формулами:

$$\eta_R = R^2 / (2 - \ln Re), \quad (6.43)$$

$$\eta_R = R^2 Re^{0,0625}. \quad (6.44)$$

Аналіз рівнянь (6.43, 6.44) свідчить, що ефект зачеплення стає суттєвим у разі осадження частинок на сферах з малим діаметром. Осадження частинок за рахунок зачеплення значною мірою визначається режимом течії газового потоку і не залежить від швидкості газів.

## 6.7 Ефективність очищення газів від пилу та технологічне обладнання

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). У випадку середнього очищення затримується пил, що містить дрібні фракції (10... 100 мкм). В цьому випадку початкова концентрація не має перевищувати 150...200 мг/м<sup>3</sup>, а кінцева – 30...50 мг/м<sup>3</sup>. Тонке очищення характеризується необхідністю вловлювання пилу (менше 10 мкм) й доведенням остаточної концентрації пилу до 1...2 мг/м<sup>3</sup>. Початковий вміст пилу не має 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.

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

$$\eta_3 = \frac{G_1 - G_2}{G_1} \cdot 100\% = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100\%; \quad (6.45)$$

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

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

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

$$\eta_n = 1 - K_n (C_2/C_1); \quad (6.46)$$

де  $K_n$  – коефіцієнт підсмоктування.

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

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 + \dots + \Phi_n = 100\%, \quad (6.47)$$

де  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  – процентний вміст пилу цієї фракції,

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

Фракційний ступінь очищення:

$$\eta_\Phi = [\Phi_{вх} - \Phi_{вих} (1 - \eta)]; \quad (6.48)$$

де  $\Phi_{вх}, \Phi_{вих}$  – 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:

$$\eta_z = \frac{\eta_{\Phi 1} \cdot \Phi_1}{100} + \frac{\eta_{\Phi 2} \cdot \Phi_2}{100} + \dots + \frac{\eta_{\Phi n} \cdot \Phi_n}{100}. \quad (6.49)$$

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:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot \dots \cdot (1 - \eta_n), \quad (6.50)$$

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

З санітарного погляду важлива не частка вловлювання пилу  $\eta$ , а частка пропущеного, що виражається у вигляді коефіцієнта проскоку:

$$P = 1 - \eta. \quad (6.51)$$

Кінцевий вміст пилу ( $C_2$ ) в повітрі, що виходить з апарата, встановлений гранично-допустимою концентрацією пилу в робочій зоні приміщення (табл. 6.4).

**Таблиця 6.4 – 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

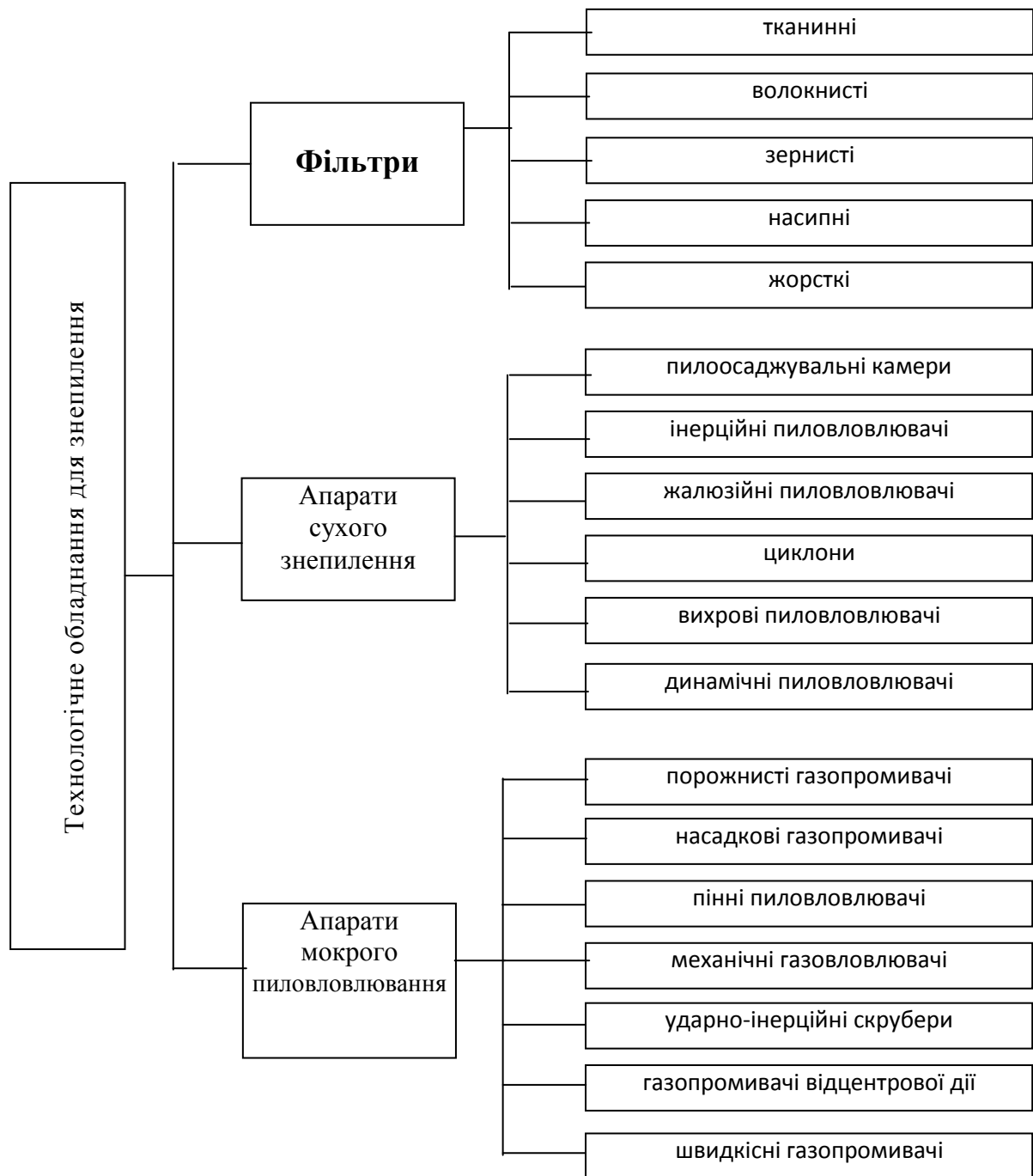
Видалення частинок пилу з газових потоків з використанням гравітаційного, інерційного, відцентрового й дифузійного осадження та за рахунок зачеплення реалізується технологічним обладнанням для сухого або мокрого пиловловлювання, класифікацію якого наведено на рис. 6.4.

Класифікацію пиловловлювачів за їх ефективністю залежно від дисперсності пилу наведено в табл. 6.5.

**Таблиця 6.5 – Класифікація пиловловлювачів за їх ефективністю**

Клас пиловловлювачів	Розміри частинок, що ефективно вловлюються, мкм	Нижня границя ефективності залежно 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

Характеристику видів технічного обладнання для знепилення, область найбільш доцільного його використання залежно від дискретності пилу та опір наведено в табл. 6.6.



**Рисунок 6.4 – Класифікація технологічного обладнання для сухого й мокрого очищення газів від пилу**

Таблиця 6.6 – Характеристика видів пиловловлювачів

Вид пиловловлювача	Тип пиловловлювача	Клас пиловловлювача за ефективністю	Область найбільш доцільного використання за групами дисперсності пилу					Опір, 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	порожністі, насадкові та пінні пиловловлювачі	II	-	-	+	+	-	200	

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

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 за відцентрового осадження.
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.

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

### 7.1 Суть абсорбційного методу очищення газових викидів та рівновага в системі газ-рідина

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 під час абсорбції переходить в рідку, називають абсорбційним компонентом або абсорбтивом. Речовину, яка міститься в газовій фазі й під час абсорбції не переходить в рідку, називають газом-носієм або інертним газом.

**Абсорбент** (поглинач) – речовина, в якій відбувається розчинення абсорбуючих компонентів очищуваного газу.

**Абсорбер** – апарат, в якому відбувається процес абсорбції.

**Абсорбцію** підрозділяють на фізичну та хімічну (хемосорбцію).

Абсорбція відбувається в випадку, якщо парціальний тиск абсорбовного компонента в газовій фазі більше його рівноважного парціального тиску компонента над цим 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.

Як поглинальні розчини у разі фізичної абсорбції використовують воду, а також органічні й неорганічні розчини, які не вступають в хімічну реакцію з абсорбувальними компонентами.

В процесі хемосорбції абсорбувальний компонент вступає в хімічну реакцію з поглиначем, утворюючи нові хімічні з'єднання в рідкій формі. У цьому випадку можливі два варіанти – протікання оборотних і необоротних реакцій. В обох випадках рівноважний парціальний тиск компонента, від якого очищається газ, значно нижчий порівняно з фізичною абсорбцією. Тобто, хемосорбційні процеси за однакових умов з фізичною абсорбцією забезпечують повніше добування компонентів з газових сумішей. Регенерацію поглинальних розчинів виконують фізичними й хімічними методами.

Як поглинальні розчини в процесі хемосорбції використовують водні розчини солей та органічних розчинників. Потрібно, щоб поглинальні розчини мали високу поглинальну спроможність й селективність відносно компонента, який добувається, були термічностійкими й спроможними до регенерації, не викликали корозію апаратів та мали 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. Необхідно, щоб поглинальний розчин мав незначну в'язкість та температуру кипіння більшу, ніж у 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.

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:  $P_n$ , Па.

Зв'язок між зазначеними величинами визначається такими формулами.

Парціальний тиск компонента:

$$P_n = Y, \quad (7.1)$$

або 
$$P_n = \bar{C} \cdot R \cdot T / M_k. \quad (7.2)$$

Парціальний тиск інертного газу:

$$P_0 = P(1 - y). \quad (7.3)$$

Об'ємна концентрація:

$$C = C / M_k. \quad (7.4)$$

Мольна частка компонента:

$$y = \bar{C} \cdot R \cdot T / P \cdot M_k, \quad (7.5)$$

$$\bar{y} = \bar{C} \cdot R \cdot T / P \cdot M_\Gamma. \quad (7.6)$$

Відносна концентрація компонента:

$$y = \bar{C} / (P / R \cdot T) M_k - \bar{C}. \quad (7.7)$$

Середня мольна маса:

для газової фази

$$M_\Gamma = M_{ог} \left[ 1 - \frac{R \cdot T}{P} \left( \sum \frac{\bar{C}}{M_k} - \sum \frac{\bar{C}}{M_{ог}} \right) \right]; \quad (7.8)$$

для рідкої фази:

$$M_p = \frac{\rho_p}{\left( \sum \frac{\bar{C}}{M_k} + \frac{\rho_p - \sum \bar{C}}{M_{ор}} \right)}, \quad (7.9)$$

де  $P$  – загальний тиск, Па;

$M_k$  – мольна маса компонента;

$M_\Gamma$ ,  $M_{ор}$  – мольні маси носія в газовій та рідких фазах;

$T$  – температура, К;

$R$  – універсальна газова стала;

$\rho_p$  – густина рідин, кг/м<sup>3</sup>.

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

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

$$m_c = C_\Gamma^* / C_p, \quad (7.10)$$

$$m_{yx} = y^* / x, \quad (7.11)$$

$$m_{px} = p^* / x, \quad (7.12)$$

$$m_{yc} = p^* / C, \quad (7.13)$$

$$m_{p\bar{c}} = y^* / \bar{C}. \quad (7.14)$$

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 для різних способів вираження складу фаз наведено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1 – Співвідношення між константами фазової рівноваги

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

Значення константи фазової рівноваги між рідкою й газовою фазами у випадку абсорбційних процесів очищення газових викидів для водних розчинів деяких газів за різних температур наведено в табл. 7.2.

Таблиця 7.2 – Значення константи фазової рівноваги для водних розчинів газів

Газ	Константа фазової рівноваги $m_{px} \cdot 10^{-4}$ , кПа за температур (°C)							
	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).

## 7.2 Кінетика процесу абсорбції

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

$$U = K_y F \Delta C_{cp} , \quad (7.15)$$

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. Згідно з цим, коефіцієнти масопередачі, віднесені до концентрації газу ( $K_y$ ) або до концентрації рідини ( $K_x$ ), можуть визначатися через коефіцієнти масовіддачі

$$1/K_y = 1/\beta_y + m/\beta_x , \quad (7.16)$$

або 
$$1/K_x = 1/m\beta_y + 1/\beta_x , \quad (7.17)$$

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

$m$  – константа фазової рівноваги.

Загальний опір дифузії масопередачі в рівнянні (7.16) подано як суму опорів дифузії газової ( $1/\beta_y$ ) та рідкої ( $m/\beta_x$ ) фаз. За аналогією в рівнянні (7.17) доданок ( $1/m\beta_y$ ) характеризує опір газової фази, а доданок ( $1/\beta_x$ ) – рідкої фази. Аналіз рівнянь (7.16) (7.17) 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 масопередачі до концентрації газу  $K_y \approx \beta_x$ . Для газів, що погано розчиняються ( $m > 100$ ), опір рідкої фази ( $m/\beta_x$ ) є значним порівняно 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. В процесі визначення  $K_y$  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

$$\beta_y = \beta_g P / R T, \quad (7.18)$$

для рідкої фази

$$\beta_x = \beta_p^2 / M_p, \quad (7.19)$$

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

$$N_u = A' Re^n P_r^m \Gamma^d, \quad (7.20)$$

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, має дорівнювати масі цього компонента, яка перейшла в рідину

$$M_k = Q_g (K_{y1} - K_{y2}) = Q_p (K_{x2} - K_{x1}), \quad (7.21)$$

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 очищуваному 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 дорівнює

$$F = 10^3 M / K_a \Delta C_{cp}, \quad (7.22)$$

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

$$K_a = \frac{53,7 \cdot 10^6 M \omega_g^{0,75} (0,0011T - 0,18)^{0,25}}{(13,7 + \sqrt{\omega_g}) d_e^{0,25}}, \quad (7.23)$$

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, який дорівнює збільшеному вчетверо значенню живого перерізу насадки, поділеного на її питому поверхню, м.

Середня рухома сила процесу абсорбції дорівнює 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 залежно від характеру руху фаз в апараті користуються одним із рівнянь для підрахунку середньої логарифмічної величини:

для прямогоку

$$\downarrow \Delta C_{cp} = \frac{(y_n - y_k^*) - (y_k - y_k^*)}{\ln((y_n - y_n^*) / (y_k - y_k^*))}; \quad (7.24)$$

для протитоку

$$\downarrow \uparrow \Delta C_{cp} = \frac{(y_n - y_k^*) - (y_k - y_n^*)}{\ln((y_n - y_k^*) / (y_k - y_n^*))} ; \quad (7.25)$$

для перехресного току

$$\downarrow \Delta C_{cp} = \frac{(y_n - y_n^*) - (y_n - y_k^*)}{\ln((y_n - y_n^*) / (y_n - y_k^*))} - \frac{y_n - y_k}{2} , \quad (7.26)$$

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:

$$y = \bar{C} R T / P M_k, \quad (7.27)$$

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

$$\Delta C_{cp} = (y_n - y_k) / N_{ог} , \quad (7.28)$$

$$\Delta C_{cp} = (x_n - x_k) / N_{оп} , \quad (7.29)$$

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

$$N_{ог} = K_y F / G_o , \quad (7.30)$$

$$N_{оп} = K_x F / L_o , \quad (7.31)$$

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

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

$$N_{оп} = N_{ог} (m / l_o), \quad (7.32)$$

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

Загальне число одиниць переносу визначають за формулою

$$1 / N_{ог} = 1 / n_y + m G_o / l_o n_x, \quad (7.33)$$

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

$$n_y = \beta_y F / G_o , \quad (7.34)$$

$$n_x = \beta_x F / L_o . \quad (7.35)$$

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. 7.1), на яку наносять робочу лінію АВ та лінію рівноваги ОС.

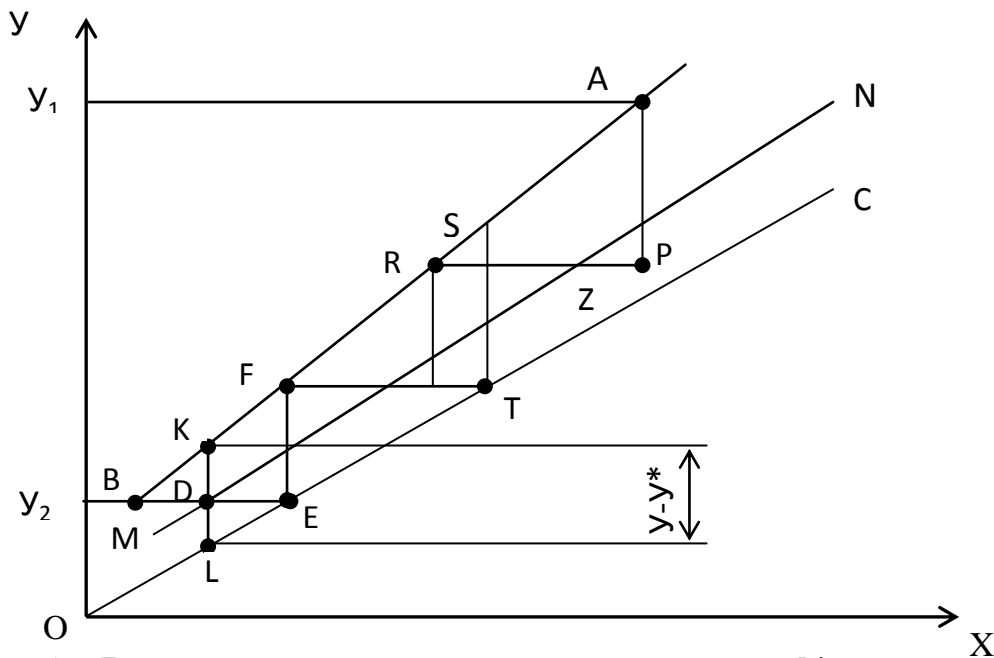


Рисунок 7.1 – Визначення числа одиниць переносу графічним методом

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 (сходинка BEF).

Продовжуючи аналогічну побудову сходинок до початкового стану газу (точка A), визначають число одиниць переносу. Якщо в кінці побудови отримують неповну сходинку ( $PZ < RZ$ ), то її вважають за повну сходинку 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

$$F = S_a N_a a, \quad (7.36)$$

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

$N_a$  – 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.

### 7.3 Технологічне обладнання для абсорбційного очищення газових викидів

Очищення газових викидів від газо- й пароподібних забруднень абсорбційним методом реалізується за допомогою технологічного обладнання, класифікацію якого наведено на рис. 7.2.



Рисунок 7.2 – Класифікація технологічного обладнання для абсорбційного очищення газових викидів

**Насадковий абсорбер** являє собою колону, що заповнена насадкою. В насадкових абсорберах контакт газу з рідиною відбувається переважно на змоченій поверхні насадки, по якій стікає зрошувальна рідина.

**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, Інталокс), хордову, плоскопаралельну, плаваючу й блочну насадку. Питома поверхня контакту фаз в цих насадках становить  $a = 50 \dots 500 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , а еквівалентний діаметр  $d_e = 0,006 \dots 0,06 \text{ м}^2$ .

Суттєво впливає на ефективність роботи насадкових абсорберів рівномірність розподілу рідини та газу по 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.

Інтенсивність масообміну, допустима швидкість газу й гідравлічний опір насадки визначаються кількістю утримуваної на насадці рідини, величина якої залежить від типу насадки. Залежно від щільності зрошення (6...12 м/год) й швидкості газового потоку (0,5...1,0 м/с) гідродинамічні режими насадкових абсорберів такі: плівковий, підвішування й емульгування. Плівковий режим характеризується незначними навантаженнями по газу й рідині. Режим підвішування настає, коли за збільшення швидкості висхідного потоку газу швидкість стікання рідини по насадці зменшується. За такого режиму відбувається накопичення рідини в місцях контакту насадки і збільшується кількість рідини, що утримується. Режим емульгування відбувається внаслідок значного накопичення рідини в насадці.

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 під час барботажу. Бульбашкова поверхня масообміну утворюється плаваючою насадкою або за допомогою тарілок, які залежно від способу організації руху газу й рідини бувають перехресного типу, прямоструминні й протиструминні.

Залежно 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 у цьому випадку порівняно невелика і залежить від діаметра бульбашок газу, що проходять через шар рідини. За збільшення 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. За подальшого збільшення 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. Під час потокового режиму 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 дорівнює сумарній поверхні крапель, потоків й плівок, що утворюються в апараті під час розбризкування рідини. За способом утворення міжфазної поверхні розпилювальні абсорбери бувають форсункові, швидкісні прямоструминні 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 за плівкового, струминного або форсункового підведення рідини. В газопромивачах другого типу рідина розпилюється за рахунок енергії газу під час удару 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. За швидкості газу в горловині 150 м/с утворюються краплі рідини розміром 50 мкм.

**Апаратами**, в яких поверхня масообміну утворюється під час удару газового потоку об поверхню рідини, є скрубери Дойля та ротоклопи. В цих апаратах, коли газ ударяється об 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. Обертовий ротор розміщується горизонтально або вертикально. Під час обертання 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, розміщеними на обертовому валу. Інтенсивність розпилення в них рідини менша, ніж в попередніх апаратах.

**Різновидом** 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 конвекція й турбулентність, вібрація, пульсація, накладання електромагнітних, електростатичних, ультразвукових полів тощо.

## **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Охарактеризуйте абсорбційний метод очищення газових викидів.
2. Поясніть суть рівноваги в системі газ–рідина.
3. Які співвідношення між константами фазової рівноваги за різних способів 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.

## **8 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ГАЗО- Й ПАРОПОДІБНИХ ЗАБРУДНЕНЬ АДСОРБЦІЙНИМ МЕТОДОМ. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ. ПРИНЦИП МЕТОДУ. АПАРАТИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВИКИДІВ. КІНЕТИКА ПРОЦЕСУ**

### **8.1 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 адсорбтивний 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. Залежно від сили притягання адсорбенту адсорбція може бути фізична або хімічна. Теплота фізичної адсорбції становить до 60 КДж/мол., а хімічної – від 20 до 400 КДж/мол.

За фізичної адсорбції взаємодія молекул з поверхнею адсорбенту визначається порівняно слабкими дисперсійними, індукційними та орієнтаційними силами. 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. У разі підвищення 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 оборотності, тобто з ротацією стадій поглинання та виділення компонента, що добувається.

Перевагою фізичної адсорбції є оборотність процесу. За зниження тиску адсорбенту в газовій суміші або за підвищення 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. Діючи у цьому випадку сили значно більші, ніж під час фізичної адсорбції. Через значну теплоту адсорбції (до 400 кДж/моль) енергія зв'язку хемосорбних молекул сильно відрізняється від енергії зв'язку цих самих молекул в потоці газу.

Відповідно енергія, яка необхідна для того, щоб хемосорбована молекула прореагувала з молекулою іншого сорту, може бути суттєво меншою, ніж енергія, 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. Під час хімічної адсорбції її швидкість за низьких температур мала, але збільшується із зростанням температури.

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

$$1 - (2\alpha/3) - (1 - \alpha)^{2/3} = k'(1/r^2) \tau, \quad (8.1)$$

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. В процесі очищення газів від газо- й пароподібних забруднень найбільш поширена фізична адсорбція.

## 8.2 Рівновага й швидкість адсорбції

Характер протікання процесу адсорбції може бути періодичним або безперервним. Періодичні процеси відбуваються за нерухомого шару адсорбенту, а безперервні – за рухомого чи киплячого шару.

Розглянемо випадок, коли в нерухомому шарі адсорбату безперервно рухається потік газу-носія з певною початковою концентрацією речовини, що поглинається. Через деякий відрізок часу на фронтальній ділянці шару адсорбату внаслідок різного спаду рухомої сили поглинання адсорбтиву 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. Водночас концентрація адсорбтиву в зоні адсорбції змінюється плавно і на виході із шару вона дорівнює 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 певної 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

$$\tau_{зд} = kH_{ш} - \tau_0, \quad (8.2)$$

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. 8.1), що в період паралельного перенесення фронту адсорбції переходить в пряму лінію.

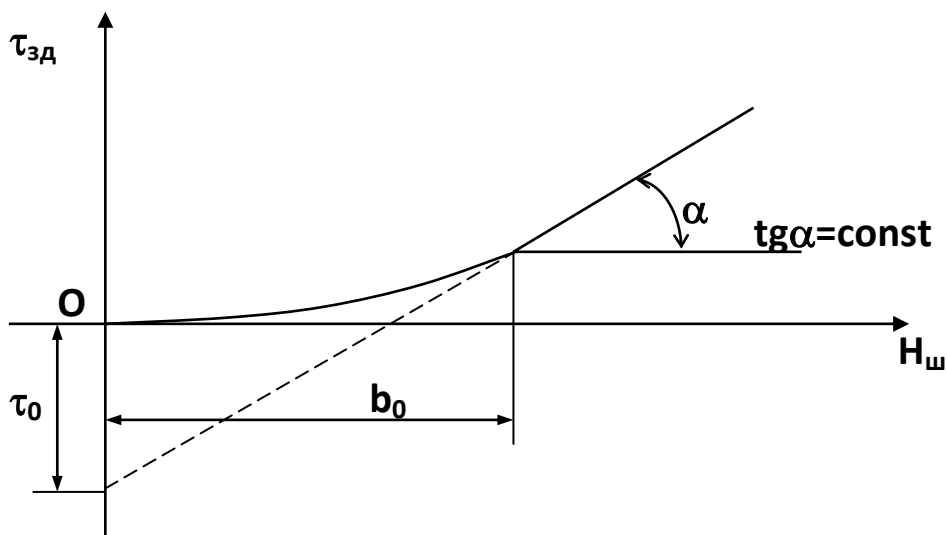


Рисунок 8.1 – Залежність часу захисної дії від висоти шару адсорбенту  $\tau_{зд} = f(H_{ш})$

Тангенс кута нахилу до осі абсцис прямолінійного відрізка кривої (рис. 8.1) 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 під час переміщення 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 дорівнює кількості молекул, що виходять з адсорбенту. Динамічна ємність адсорбенту менша за статичну, 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 ( $P$ ) за постійної температури процесу. Існує п'ять типів фізичної адсорбції (рис. 8.2). Ізотерма типу (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.

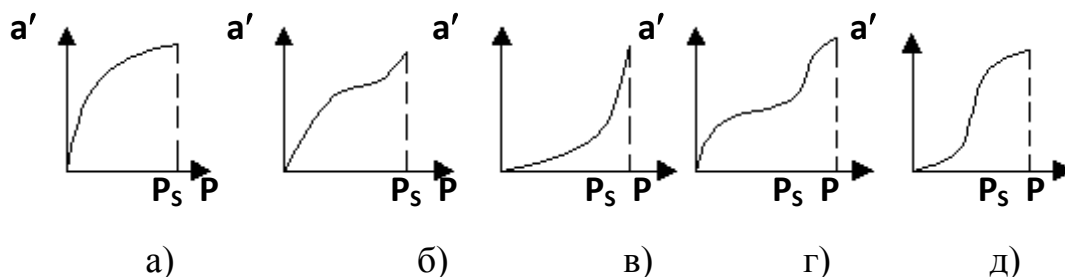


Рисунок 8.2 – Типи ізотерм процесу адсорбції

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

Швидкість процесу адсорбції зменшується з підвищенням температури, що графічно відображає ізобара адсорбції (рис. 8.3). Вона показує зміну кількості адсорбованої речовини залежно від температури за постійного тиску.

В процесі підвищення концентрації адсорбтиву над поверхнею адсорбенту за сталої температури активність адсорбенту збільшується. Це збільшення продовжується тільки до певного моменту, коли досягається повне насичення адсорбенту, тобто коли досягається максимальна поглинальна ємність адсорбенту.

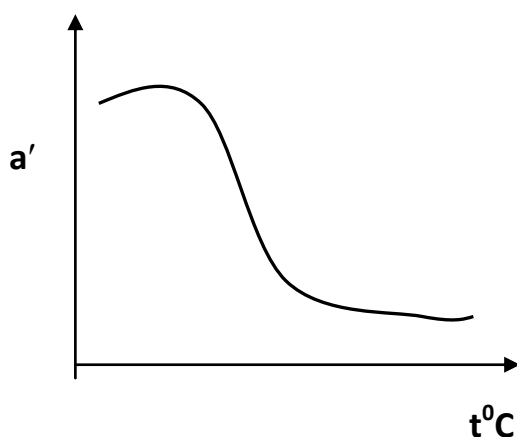


Рисунок 8.3 – Ізобара процесу адсорбції

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 всередині гранул залежить від їх розмірів, діаметра пор, розмірів молекул адсорбтиву, температури тощо.

### 8.3 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 внаслідок спеціальної обробки.

Адсорбенти мають 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 кількість 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 становить 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 за величиною адсорбції, що відповідає покриттю адсорбенту моношаром адсорбованих молекул

$$\xi = N_A a_m S_m, \quad (8.3)$$

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:

$$S_m = 1,53 V^{2/3}, \quad (8.4)$$

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

Величину адсорбції можна визначити за ізотермою адсорбції або за рівнянням

$$\frac{P}{a'(P_s - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C \cdot P_s}, \quad (8.5)$$

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

$$C = e^{(g_1 - g_2)/RT}, \quad (8.6)$$

де  $g_1$  – теплота адсорбції першого шару;

$g_2$  – прихована теплота конденсації.

Питома поверхня твердого тіла визначається за формулою,  $m^2/g$

$$S_n = (V_m/M) N_A S_m \cdot 10^{-20}, \quad (8.7)$$

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 побудовано каркас пористого адсорбенту. Адсорбент з великими порами краще адсорбує речовини з великими розмірами молекул та за значних тисків. Середньопористий адсорбент за середніх тисків ефективніше адсорбує, а дрібнопористий – за низьких тисків. Основну роль під час розділення газових сумішей відіграють мікропори. Питомий опір мікропор в адсорбентах досягає 0,2...0,6  $cm^3/g$ , а питома поверхня – до 500  $m^2/g$  та більше. Об'єм та розміри пор визначають методом ртутної пірометрії.

Сумарний об'єм пор, г/см<sup>3</sup>

$$V = 1/\rho_y = -1/\rho_d, \quad (8.8)$$

де  $\rho_d$  – дійсна щільність;

$\rho_y$  – уявна щільність.

Дійсна щільність адсорбенту

$$\rho_d = \frac{\rho_p a_n}{(g_2 - g_1) - (g_3 - g_4)}, \quad (8.9)$$

де  $\rho_p$  – щільність пікнометричної рідини, в ролі 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:

$$\rho_y = \frac{13,546 a_n}{(g'_1 - g'_2) + a_n}, \quad (8.10)$$

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

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

Значення дійсної, уявної та насипної щільності деяких адсорбентів наведено в табл. 8.1.

Таблиця 8.1 – 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 такий самий 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 за звичайних (110...130 °С) та підвищених (300...400 °С) температур; витісненням поглиненої речовини та десорбція комбінованими методами. Час десорбції розраховують за допомогою рівняння

$$\tau_d = 1/K_d \ln(a_n - a_p)(a' - a_p), \quad (8.11)$$

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 до вугілля. Внаслідок цього вилучається волога та частково смоли. Пориста структура утворюється як результат 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 °С). Силікагелі за своєю хімічною природою є гідратованим кремнеземом ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Силікагель виробляють у 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, модернит, клиноптилолит тощо. Шляхом термічної обробки ці речовини перетворюють в ефективні адсорбенти, що мають значну пористість, велику поверхню і однакові за розмірами пори. Адсорбційна 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.

#### **8.4 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, класифікацію якого наведено на рис. 8.4.

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. У разі чотиристадійного режиму роботи в апараті послідовно виконуються такі операції: адсорбція, десорбція, сушення адсорбенту та охолодження адсорбенту. У випадку двостадійного режиму 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. У цьому випадку 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 під час 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. Водночас 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 дорівнює діаметру апарата. Недоліками апаратів з киплячим шаром є те, що киплячий шар створюється тільки за певних швидкостей газу, які в

деяких випадках не є оптимальними для фізико-хімічного процесу адсорбції та не всі матеріали можна перевести в псевдорідинний стан.

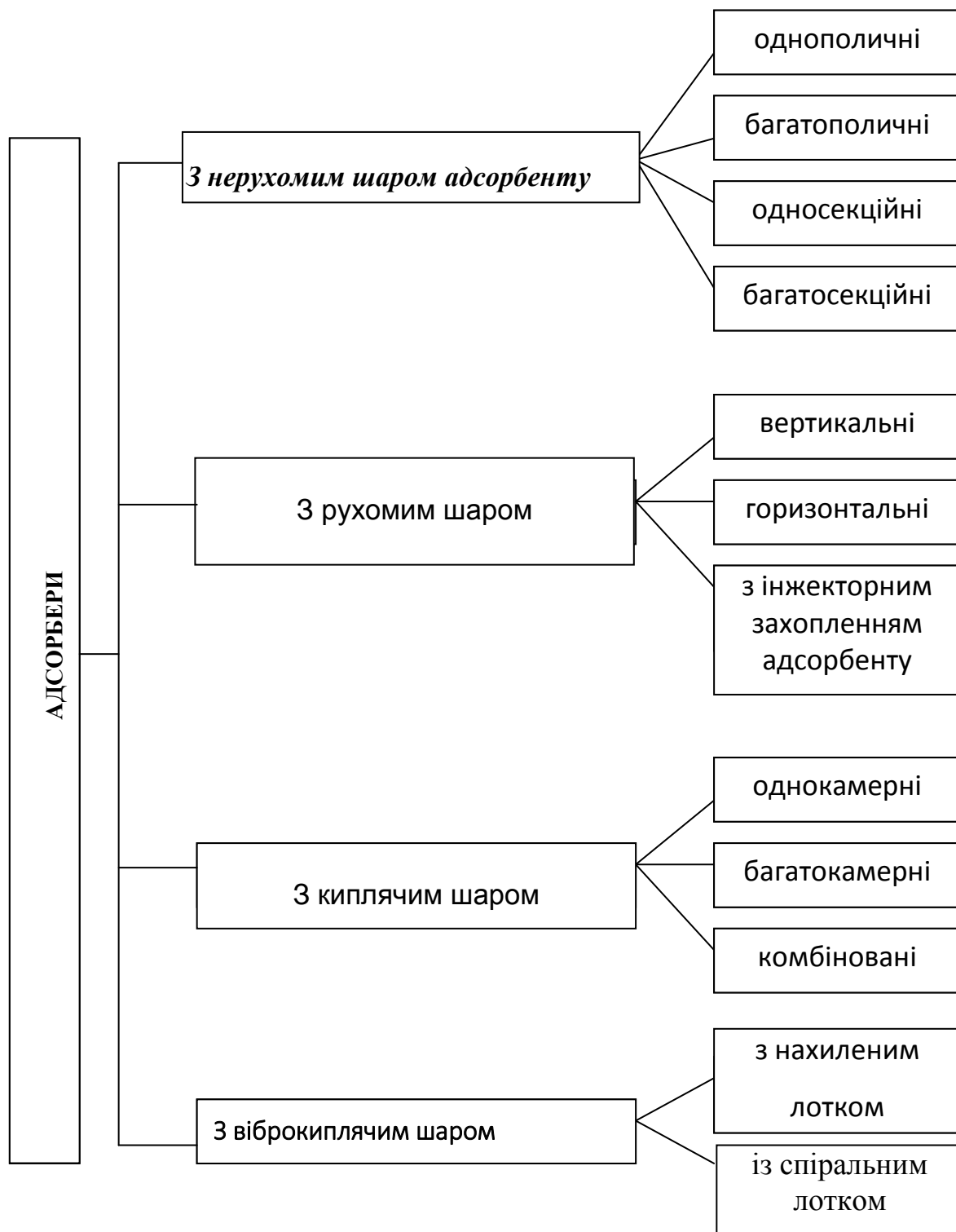


Рисунок 8.4 – Класифікація технологічного обладнання для адсорбційного очищення газів

Одним з прийомів підвищення стабільності киплячого шару в адсорбері є створення низькочастотних вібраційних коливань. Під дією вібраційних сил утворюється віброкиплячий шар адсорбенту, що забезпечує гарне перемішування твердої та газоподібної фаз. Внаслідок цього 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-нерухомому середовищі та за однакової 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 за малого гідравлічного опору шару. Підвищення швидкості руху приводить до інтенсифікації процесу масопередачі, але водночас суттєво збільшується гідравлічний опір та енергетичні затрати на транспортування газів.

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

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Охарактеризуйте адсорбційний метод очищення газових викидів.
2. В чому різниця між фізичною й хімічною адсорбцією?
3. Поясніть суть рівноваги у випадку адсорбційного процесу.
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?

## 9 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ КАТАЛІТИЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ТА ТЕРМІЧНОГО ЗНЕШКОДЖЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ

### 9.1 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. Під час гомогенного каталізу каталізатор та реагуючі речовини знаходяться в одній фазі, наприклад, газовій. Під час гетерогенного процесу 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 розірвання старих зв'язків, то вона частково компенсується енергією, що звільняється в процесі створення нових зв'язків. Ступінь компенсації описується рівнянням

$$\alpha_k = (\sum E_3 - E) / \sum E_3, \quad (9.1)$$

де  $\sum E_3$  – сума енергій зв'язків, що розриваються;

$E$  – енергія активації.

Ступінь компенсації ( $\alpha_k = 92...96\%$ ) 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.

Під час очищення 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 потрібно, щоб мала енергію активації, що значно менша, ніж енергія активації реакції за 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

$$u = K \Delta P P^n \beta, \quad (9.2)$$

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 за температур, 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, оскільки 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

$$U_d = dG / d\tau = - D_e a_k dc / dt, \quad (9.3)$$

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

$$\tau = l^2 / 2 D_e, \quad (9.4)$$

де  $l$  – глибина пори каталізатора.

У випадку, коли довжина вільного пробігу молекули компонента ( $\lambda$ ) менша за діаметр 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

$$D_e = D_r = \frac{0,00837 T^{5/2} \sqrt{1/M_A + 1/M_B}}{P(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2 (T + C_{A+B})}, \quad (9.5)$$

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

$$C_{A+B} = 1,47 \varphi (T_A' T_B')^{0,5}, \quad (9.6)$$

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

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

$$\varphi = 8 \frac{(V_A V_B)^{0,5}}{V_A + V_B}. \quad (9.7)$$

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

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

$$D_e = 2/3 r \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (9.8)$$

Якщо довжина вільного пробігу молекули компонента дорівнює радіусу пори, то

$$D_e = D_r (1 - e^{-2r/\lambda}). \quad (9.9)$$

Суттєво впливає на процес каталізу температура. Вона не тільки змінює швидкість каталізу, але й лімітує стадію процесу. За відносно низьких температур, коли швидкість реакції мала порівняно 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. За певних температур 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 меншим одиниці. Швидкість каталізу в цьому випадку буде лімітуватися процесом перенесення речовини в мікропорах каталізатора. За подальшого збільшення 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.

## 9.2 Характеристика каталізаторів

Як каталізатори використовують речовини, що не входять в кінцеві продукти хімічної реакції, але змінюють її швидкість. Потрібно, щоб каталізатори мали такі властивості: високу активність й селективність відносно цієї реакції; високу хімічну стійкість відносно каталізаторної отрути; низьку температуру запалювання; термічну стійкість; підвищену

теплопровідність; значний температурний інтервал роботи; високу механічну міцність; бути дешевими у використанні. Як каталізатори 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, порівняно 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 структуру каталізаторів та зменшувати витрати каталітично активних речовин. Як носії 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

$$A = V_k / V, \quad (9.10)$$

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

Якщо реакція за відсутності каталізатора не відбувається, то активність каталізатора може бути виражена кількістю продукту в кілограмах, що її отримано внаслідок каталітичної реакції, 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 під час каталізу 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. У разі тимчасового отруєння каталізатора після видалення отрути він повністю відновлює свою активність. У випадку постійної втрати активності після видалення отрути каталізатор не поновлює свої властивості. В цьому випадку регенерацію можна виконати прокалюванням та обробкою кислотами або лугами.

Температура запалювання – мінімальна температура, за якої каталізатор починає проявляти свої властивості. З метою зниження енергії на нагрівання доцільно використовувати каталізатори з мінімальною температурою запалювання. Це дозволяє знизити затрати енергії на нагрівання сировини, скоротити теплові втрати, запобігти перегріванню каталізатора, продуктів каталізу та обладнання.

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

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

Довговічність каталізатора визначається його механічними властивостями. Норма стирання каталізаторів в киплячому шарі становить 1...3 % на місяць.

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

Технологія отримання каталізаторів 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 каталізаторів містить такі стадії: підготовку сировини, розчинення, сушіння, прокалювання та формування таблеток.

### 9.3 Технологічне обладнання для каталітичного очищення газів

Для каталітичного очищення газових викидів використовують різне за способом взаємодії з каталізатором та функціональним призначенням обладнання, класифікацію якого наведено на рис. 9.1.

Апарати з фільтрувальним шаром каталізатора бувають ємнісні, трубчасті і з полицями. Принцип їх дії ґрунтується на фільтрації газу через шар нерухомого каталізатора. Каталізатор може бути у вигляді металевих сіток, натягнутих за рухом газу, трубчастих контактних апаратів та у вигляді твердих тіл різної форми, що розміщені на перфорованих решітках.



Рисунок 9.1 – Класифікація технологічного обладнання для каталітичного очищення газів

Гази надходять в апарат знизу або зверху. У випадку подавання газу знизу його швидкість не має перевищувати швидкість псевдоруку 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. Багатошарові 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 гарну теплопровідність шару і високі коефіцієнти тепловіддачі від шару до поверхні теплообмінників. Рухомий шар каталізатора дозволяє механізувати 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 протиструменя та підвищена ерозія обладнання, яке розміщене в зоні киплячого шару.

Сучасне технологічне обладнання для каталітичного очищення газів має бути високопродуктивним, забезпечувати безперервність каталітичного процесу за оптимальних робочих режимів, бути легким в управлінні та піддаватись автоматизації. З метою вдосконалення й інтенсифікації каталітичних процесів необхідно впроваджувати нові ефективні каталізатори з високою активністю, вибірковістю, універсальністю відносно 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 мають забезпечувати велику продуктивність, незначний гідравлічний опір, доступність для завантаження й вивантаження каталізатора, мати невелику металоємність, бути доступним для монтажу, ремонту й транспортування.

## 9.4 Суть термічного знешкодження парогазових викидів

Термічне знешкодження парогазових викидів ґрунтується на високотемпературному спалюванні горючих домішок, тобто окисненні знешкоджуваних компонентів. Цей метод має значне поширення тому, що відсутнє шлакове господарство й стічні води, невеликі розміри установок, простота обслуговування, можливості автоматизації, висока ефективність знешкодження за низьких затрат коштів.

Під час вибору термічного методу необхідно враховувати характер речовин, що утворюються в процесі реакції окислення. Під час спалювання 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, яка характеризується верхньою та нижньою границею вибуху, що залежать від температури, тиску, концентрації інертних газів. Концентрація горючих речовин в суміші не має перевищувати 25 % нижньої границі вибуху. Для запобігання утворення вибухонебезпечних сумішей концентрацію газових викидів зменшують добавками повітря. За термічного знешкодження парогазових викидів необхідно враховувати наявність в них речовин, що конденсуються (смола, гарячий пил). Під час транспортування 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

$$\tau = \sqrt{\frac{\ln \frac{1}{(1-\varphi)}}{A(T_k - T_3)}}, \quad (9.11)$$

де  $\varphi$  – 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.

У разі збільшення часу протікання процесу й інтенсивності турбулентної дифузії ступінь знешкодження, якщо температура не змінюється, суттєво збільшується. Якщо час протікання та аеродинамічні

умови процесу незмінні, то збільшення ступеня знешкодження можна досягнути за рахунок підвищення температури.

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

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

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

Термічне знешкодження парогазових викидів реалізується в різних за конструктивними особливостями топкових пристроях, класифікацію яких наведено на рис. 9.2.



Рисунок 9.2 – 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 за температури 850...930 °С, 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 °С. Ці печі мають залежно від хімічного складу продуктів, які спалюються, різні конструктивні особливості. Ефективність очищення становить 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 становить 99...100 %. Додаткова кількість тепла, що отримується за термічного знешкодження 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 знешкоджуваних газів шари насадки забезпечують утилізацію тепла за допомогою насадки, яка нагрівається продуктами горіння і віддає акумульоване тепло знешкодженню 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.

Під час термічного знешкодження високомолекулярних речовин, зокрема канцерогенних, неможливо досягнути їх повного окислення навіть за 1300 °С. Для знешкодження таких речовин використовують комбіновані термокatalітичні установки, що мають два ступеня. В першому ступені відбувається термічне знешкодження домішок, а в другому – глибоке окислення кatalітичним способом.

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

Знешкодження парогазових викидів в факельних пристроях використовують тоді, коли їх неможливо знешкодити в топкових пристроях. В факельних пристроях спалюють нафтові супутні гази, ацетилен, пропан, метан, пропілен та інші вуглеводні. Залежно 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, класифікацію яких наведено на рис. 9.3.

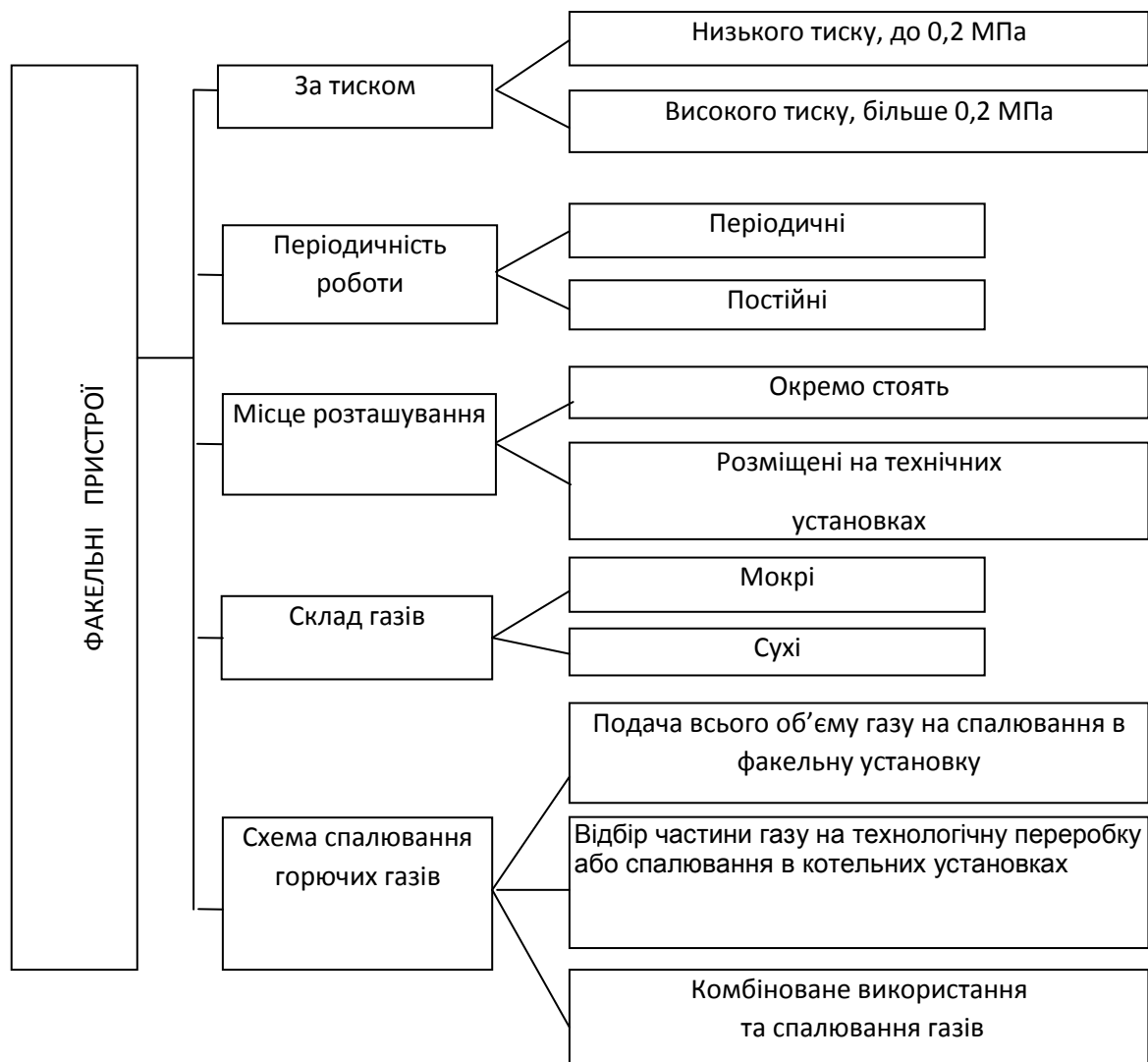


Рисунок 9.3 – Класифікація технологічного обладнання для термічного знешкодження парогазових викидів в факельних установках

Основною частиною факельної установки є факельна труба, 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 вибирається 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, розміщених на периферії факельного пальника. Під час спалювання різних газів передбачають декілька факельних труб, що монтуються в одну конструкцію. Конструкції пальників можуть бути різними залежно від особливостей термічного знешкодження викидних парогазових викидів.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

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

## 10 ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА МАГНІТНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ

### 10.1 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. 10.1).

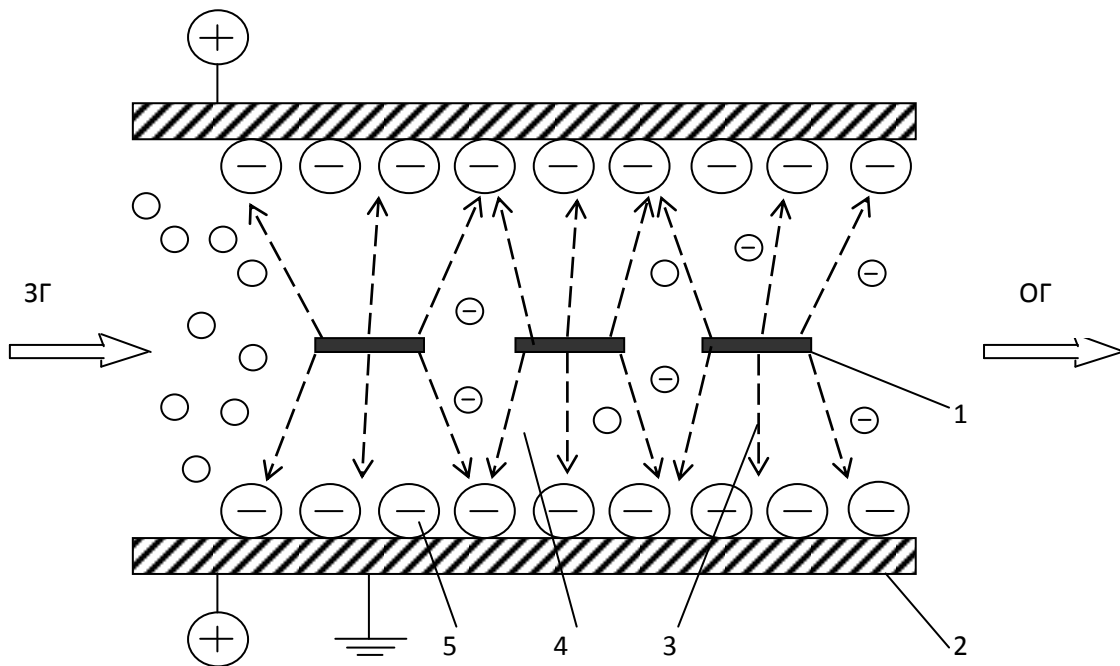


Рисунок 10.1 – Принцип роботи електрофільтра:

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

Коронувальні електроди 1 ізолювані 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 знака, а швидкість руху – від напруженості електричного поля. Чим вища напруженість електричного поля між коронувальним і осаджувальним електродами, тим більше прискорення отримують іони та електрони. За достатньо високої 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. З віддаленням на відстань  $X$  від коронувального електрода напруженість електричного поля зменшується до величини, яку можна визначити за формулою, В/м:

$$E_x = U / 2,3 \lg (R_2/R_1), \quad (10.1)$$

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

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

Розряд зі змінною напруженістю називається коронним, а напруга, за якої виникає коронний розряд, – критичною. Зміну сили струму і напруги під час коронного розряду наведено на рис. 10.2.

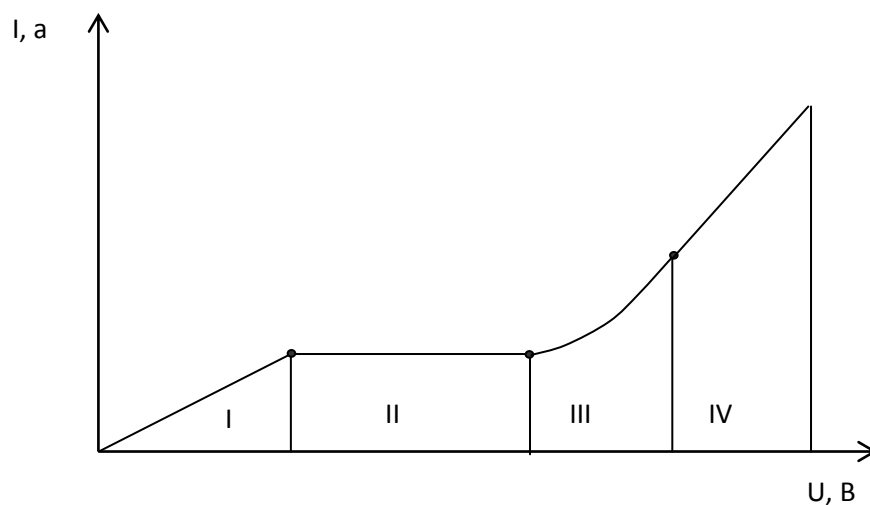


Рисунок 10.2 – Зміна сили струму із збільшенням напруги в електрофільтрі

Відповідно до рис. 10.2 зміни 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 слабке світіння навколо коронувального електрода блакитно-фіолетового кольору. Критичну напруженість електричного поля, за якої виникає корона, для повітря обчислюють за формулою, В/м:

$$E_0 = 3,04/\beta + 0,0311\sqrt{\beta/R_1} \cdot 10^{-6}, \quad (10.2)$$

де  $R_1$  – радіус коронувального електрода, м;

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

$$\beta = (P_{\text{бар}} + P) 293 / 101,3 \cdot 103 (273 + t), \quad (10.3)$$

$P_{\text{бар}}$  – 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 за суттєвого значення напруги, що перевищує критичне значення. Зовнішнім виявом дугового розряду є збільшення споживання струму (див. рис. 10.2). На інтенсивність коронування суттєво впливає також хімічний склад газу. Наявність діоксиду вуглецю, водяної пари та сірчаного ангідриду збільшує робочу зону коронного розряду. За нормальних умов напруженість електричного поля становить 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, переважно, 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.

Під час збільшення 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, за якого припиняється процес зарядження, обчислюється за формулою, Кл

$$q_{\text{max}} = \pi d^2 \epsilon_0 E_3 p_e = n e, \quad (10.4)$$

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;

$E_3$  – напруженість електричного поля коронного розряду в зоні знаходження частинок, В/м;

$p_e$  – показник діелектричних властивостей частинок, для провідних

$p_e = 3$ , а для діелектричних  $p_e = 1,2$ .

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

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

$$q_{\max} = 108 e d . \quad (10.5)$$

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

$$FE = q E , \quad (10.6)$$

де  $E$  – напруженість електронного поля, В.

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

$$\omega_{oc} = \frac{q E C_k}{3 \pi \mu_{\Gamma} d} , \quad (10.7)$$

де  $C_k$  – поправка Кенінгена–Міллікена,

$\mu_{\Gamma}$  – динамічна в'язкість газу, Па·с;

$q$  – максимальний заряд частинок, що його обчислюють за формулами (10.4, 10.5) залежно 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

$$1/C_1 - 1/C_2 = 4 q^2 C_k t / 3 d \mu_{\Gamma} , \quad (10.8)$$

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. Через це рух середовища не впливає на розсіювання і рівняння (10.8) справедливо для аерозолів, що знаходяться в ламінарному та турбулентному режимі течії.

У 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, однаковий із

знаком заряду осаджувального електрода. Час перезарядження визначається опором пилу, що міститься в газових викидах.

Залежно від питомого опору пилу, що осідає на електроді електрофільтра, він поділяється на три групи.

Перша група – питомий електричний опір пилу до 102 Ом·м. Час розрядження шару такого пилу надто малий. Частинки під час торкання до поверхні електрода миттєво перезаряджаються, внаслідок чого вони можуть відштовхуватися від електрода та знову потрапляти в потік газів, що виходить з електрофільтра.

Друга група – питомий електричний опір пилу 102...108 Ом·м. Пил газових викидів добре осаджується на електродах та легко видаляється з них під час струшування.

Третя група – питомий електричний опір пилу перевищує 108 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.

## **10.2 Технологічне обладнання для електричного очищення газових викидів**

Очищення газових викидів від забруднень електричним методом реалізується за допомогою електрофільтрів, класифікацію яких наведено на рис. 10.3.

Агрегатами живлення електрофільтрів є регулятор напруги, підвищувальний трансформатор та високовольтний випрямляч. Ефективність роботи електрофільтра визначається робочою напругою, яка має наближатися до напруги пробою. Оптимальний режим роботи електрофільтрів забезпечується регулюванням напруги на електродах, яка має підтримуватися на максимально високому рівні. Напруга пробою в електрофільтрі залежить від кількості очищуваних газів, їх температури, вологості, густини, концентрації частинок в газах, наявності шару пилу на електродах тощо. Напруга пробою 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.

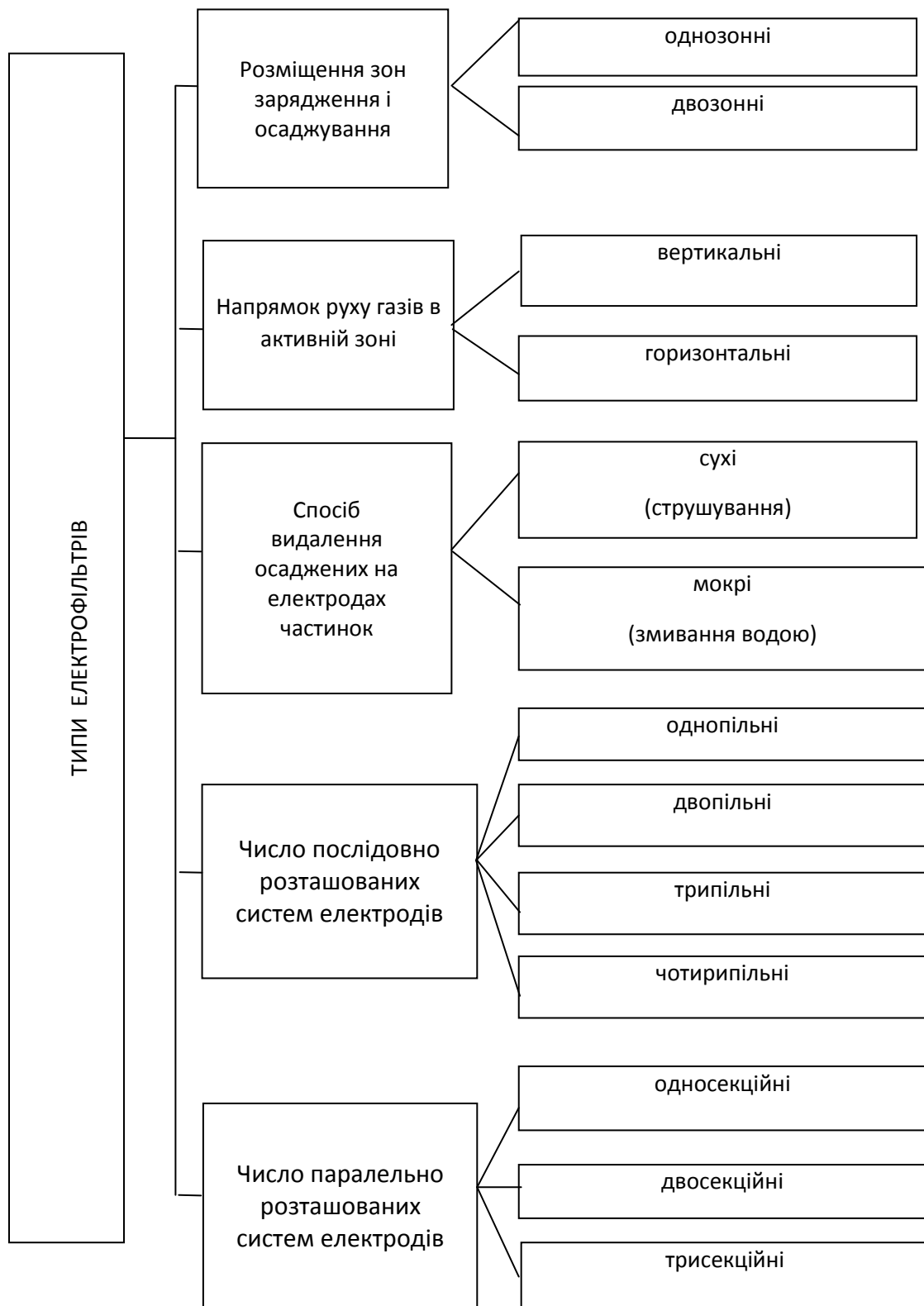


Рисунок 10.3 – Класифікація електрофільтрів

### 10.3 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.

Очищений газ пропускається через фільтрувальну (гранульовану) намагнічену насадку, що безпосередньо контактує з потоком газу чи рідини (рис. 10.4).

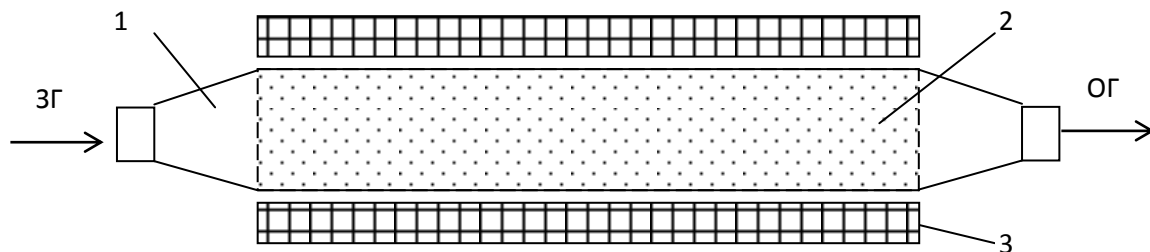


Рисунок 10.4 – Соленоїдний фільтр осаджувач:

1 – корпус; 2 – фільтрувальна насадка; 3 – соленоїд для створення магнітного поля

Перевагою гранульованих насадок є те, що під час дії на них порівняно невеликим намагнічувальним полем в їх порах, переважно поблизу точок контакту гранул, формується поле високої напруженості з високим ступенем неоднорідності. Сформоване поле набагато перевищує напруженість намагнічувального 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. У цьому випадку магнітофільтраційне очищення відбувається за порівняно великих робочих швидкостей 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 за температур до 800 °С, що дозволяє використовувати їх для очищення газових викидів, які знаходяться в різних температурних режимах.

Якщо тверда частинка не має природних магнітосприйнятливих властивостей, то механізм її переміщення в магнітному полі такий: під час

руху в газовому потоці з певною швидкістю частинка одержує електричний заряд. За потрапляння частинки в магнітне поле певної напруженості на неї буде діяти сила, перпендикулярна до напрямку магнітного поля та до напрямку руху частинки. Внаслідок дії цих сил частинка зміщується зі швидкістю, яка може бути визначена за законом Стокса

$$\omega = \frac{C_k q H V_r m_a m_b}{3\pi \mu_r d}, \quad (10.9)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля, А/м;

$V_r$  – швидкість руху газового потоку, м/с;

$m_a$  – абсолютна магнітна проникність вакууму,  $1,257 \cdot 10^{-6}$  Гн/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, дорівнює алгебраїчній сумі сил притягування та відштовхування.

#### 10.4 Технологічне обладнання для магнітного очищення газових викидів

Очищення газових викидів від забруднень магнітним методом реалізується за допомогою технологічного обладнання, класифікацію якого залежно від особливостей намагнічувальних систем та їх компоновки з зоною осадження домішок наведено на рис. 10.5.



Рисунок 10.5 – Класифікація магнітних фільтрів

В електромагнітних фільтрах з осердям-насадкою робоча насадка розміщена безпосередньо в порожнині намагнічувальних котушок. Насадка в цих конструкціях є своєрідним осердям намагнічувальної котушки.

Багатополюсні фільтри з «відділеними» електромагнітами мають значну кількість малогабаритних котушок із сталевими осердями-магнітопроводами, що розташовані за межами насадки і направлені своїми полюсами на насадки. В цих фільтрах осердя разом з насадкою становлять 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

1. Охарактеризуйте магнітне очищення газових викидів.
2. Від яких факторів залежить швидкість руху частинок в магнітному полі?
3. Розкрийте особливості існуючих магнітних фільтрів.
4. Охарактеризуйте електричний метод очищення газових викидів.
5. Як змінюється сила струму із збільшенням напруги в електрофільтрі?
6. Поясніть, від чого залежить максимальний заряд частинок, за якого припиняється процес зарядки.
7. Від чого залежить швидкість осадження заряджених частинок в електрофільтрі?
8. Охарактеризуйте групи пилу, що осідає на електроді, залежно від його питомого опору.
9. Наведіть класифікацію електрофільтрів.
10. За рахунок чого збільшується ступінь очищення в електрофільтрах?

## Література

1. Закон України «Про охорону навколишнього середовища»  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>
2. Закон України «Про охорону атмосферного повітря»  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>
3. Закон України «Про охорону водних ресурсів»  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>
4. Лялюк О. Г., Ратушняк Г. С. Моніторинг атмосферного повітря. Вінниця : ВДТУ, 1998. 94 с.
5. Лялюк О. Г., Ратушняк Г. С. Моніторинг довкілля : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ. 2004. 140 с.
6. Моніторинг довкілля : підручник / за редакцією Боголюбова В. М., Сафронова Т. А. Херсон : Грінь Д. С. 2011. 530 с.
7. Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Лялюк О. Г. Інженерні вишукування : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ. 2019. 150 с.
8. Ратушняк Г. С. Теоретичні основи очищення газових викидів : навчальний посібник. Вінниця : ВДТУ. 2002. 96 с.
9. Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г. Засоби очищення газових викидів : навчальний посібник. Вінниця : УНІВЕРСУМ. 2008. 207 с.
10. Северин Л. І. Захист атмосфери. Ч.1 та 2. Вінниця : ВПІ, 1994. 177 с.
11. Гічов Ю. О. Очищення газів. Ч. 1 : конспект лекцій. Дніпропетровськ : НМетАУ. 2015. 51 с.  
[https://nmetau.edu.ua/file/21.gichov\\_yu.o.ochischennya\\_gaziv.chastina\\_i.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/21.gichov_yu.o.ochischennya_gaziv.chastina_i.pdf)
12. Півощенко І. М. Клімат Вінницької області. Вінниця : ВАТ «Віноблдрукарня», 1997. 240 с.

*Електронне навчальне видання*

**Георгій Сергійович Ратушняк**

**МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ ТА  
ТЕОРЕТИЧНІ  
ОСНОВИ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ  
ВИКИДІВ**

Навчальний посібник

Рукопис оформив *Г. Ратушняк*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовила *Т. Старічек*

Підписано до видання 10.04.2026 р.

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2026-039.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,

Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95,

м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

Email: irvc.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.