

## Тема: Біотехнологія очистки газоподібних відходів і ґрунту

**Мета:** сформувати знання про традиційні й новітні біотехнології очистки газоподібних відходів і ґрунту, забруднених поллютантами.

### План

1. Біотехнологія очистки газоподібних відходів.
2. Системи очищення газоповітряних викидів біотехнологічних виробництв.
3. Методи очистки ґрунту.

**Основні терміни і поняття:** біоплівка, біореактори, біоскрубери, іммобілізовані мікробні клітини, активний мул.

### 1. Біотехнологія очистки газоподібних відходів.

Очистка газоподібних відходів є обов'язковим етапом для промислових виробництв, що виділяють токсичні й біологічно активні сполуки в атмосферу. Наприклад, підприємства з виробництва барвників, необхідно очищувати від органічних розчинників, підприємства хімічисток і знежирювальних процесів – від хлорвміщуючих вуглеводнів; овочевих складів – від етилену, що утворюється при зберіганні овочів.

У якості сорбентів для очистки таких газоподібних відходів використовують деревне вугілля або ґрунт, на поверхні яких утворюються плівка з аеробних бактерій, що активно руйнують дані сполуки. Найчастіше використовують синтетичні носії, подрібнену деревину або кору дерев, торф або ґрунт. Крізь шар такого носія, який попередньо зволожують, пропускають забруднене повітря. При цьому утворюється **біоплівка**, що являє собою складний комплекс мікроорганізмів.

Для очистки газоподібних відходів, що містять токсичні сполуки також використовують спеціальні установки, у яких гази пропускають крізь рідину в промивних камерах. Там відбувається інтенсивний газо- і водообмін. Після чого промивні води додатково очищують шляхом мікробного окиснення.

Для біологічної очистки застосовують три типи установок: **біофільтри, біоскрубери і біореактори з омивним шаром.**

#### 1. Біофільтри.

Принципова схема для біологічної очистки була запропонована в 1941 р. Прюссом. Перший у Європі біофільтр було побудовано в Німеччині в 1980 році, а в 1984 році тільки в Німеччині було 240 установок.

Основним елементом біофільтра для очистки повітря є **фільтрувальний шар**, який сорбує токсичні сполуки з повітря. Потім ці речовини в розчиненому стані дифундують до мікробних клітин, де підлягають деструкції. У якості носія для фільтрувального шару використовують компост, торф тощо. Ці матеріали містять у

своєму складі різні мінеральні солі й сполуки, необхідні для розвитку мікроорганізмів. Тому до біофільтрів не вносять будь-які домішки.

Повітря, що очищується, подається вентилятором до системи, проходить крізь фільтрувальний шар (знизу вгору, або навпаки). При цьому повітря повинне проходити крізь усю масу фільтрувального шару. Необхідно: однорідність шару, вологість 40–60%. Зволоження матеріалу забезпечується розбризкуванням води на поверхні фільтрувального шару. У матеріалі не повинно бути різких градієнтів температури і рН середовища, для цього повітря, що подається на біофільтр, підігрівають.

## **2. Біоскрubber.**

Принцип роботи біоскрубера принципово відрізняється тим, що процес очищення повітря реалізується *у дві стадії у двох різних установках*.

На першому етапі в адсорбері токсичні речовини і кисень розчиняються у воді. У результаті повітря очищується, а забруднена вода відводиться для подальшого очищення. Типи адсорберів: барботажні, насадочні, розпилювальні, форсункові. Метою конструктивних удосконалень адсорберів є збільшення площі поверхні розподілу фаз, що обумовлює ефективність адсорбції.

На другій стадії забруднена вода надходить до аеротенку, де вона піддається регенерації. У ході очистки складні органічні сполуки окиснюються мікроорганізмами активного мулу до кінцевих продуктів з утворенням біомаси.

## **3. Біореактор з омивним шаром.**

Робочим тілом цієї системи є іммобілізовані мікроорганізми. Біошар біореактора являє собою гранули з іммобілізованими мікробними клітинами, що омивається водою, яка містить мінеральні сполуки. Забруднене повітря проходить крізь біошар, при цьому сполуки, що підлягають деструкції, дифундують у біоплівку, яка вкриває частинки біокатализатора, і потім окиснюються мікроорганізмами. Швидкість деструкції лімітується швидкістю дифузії речовин із газової фази в рідину (залежить від природи речовини, концентрації), а також швидкістю реакцій, що протікають у мікробних клітинах. Періодично (один раз на декілька місяців) біошар очищують від надлишку біомаси і наповнюють свіжими гранулами.

Біоскрубери порівняно з біофільтрами займають меншу площу, адже являють собою башти декілька метрів заввишки. Проте експлуатаційні витрати більші, адже процес біоочистки води потребує суттєвих витрат. Застосування біоскруберів є ефективним при наявності в повітрі добре розчинних токсичних речовин. Ефективність очищення повітря в біоскруберах вища порівняно з біофільтрами.

Найбільш ефективними для очистки повітря є біореактори з омивним шаром. Такі малогабаритні установки досить ефективні для очистки повітря тваринницьких комплексів. Ступінь очистки в реакторі з іммобілізованими на активованому вугіллі мікроорганізмами від ацетону, бутанолу, етилацетату становить 90 %.

Відомі інші способи комплексної очистки повітря, наприклад, на основі ростучої суспензії мікроорганізмів. Пропускання повітря, що насичене сірководнем,

сірчаним ангідридом, парами сірки, крізь інтенсивну культуру мікроводорості *Chlorella*, яка має велику поверхню контакту суспензії з повітрям (очистка 100%).

Спосіб комплексної очистки стоків і забрудненого повітря від аліфатичних кислот, спиртів, альдегідів, вуглеводнів у аеротенках з активним мулом (для фармацевтичних виробництв).

Для детоксикації ціаніду в промислових викидах запропоновані біологічні методи, що включають використання різноманітних реагентів, від активного мулу до специфічних ферментів, що руйнують ціаніди.

**Таблиця 1 – Класифікація установок біологічної очистки повітря.**

| Тип установки                     | Робоче тіло                                                           | Водний режим             | Основна стадія видалення домішок з повітря                                        | Джерело мінеральних солей            |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Біофільтр</b>                  | Фільтруючий шар – іммобілізовані мікробні клітини на природних носіях | Циркуляція води відсутня | 1) десорбція матеріалом фільтруючого шару;<br>2) деструкція мікробними клітинами. | Матеріал фільтруючого шару           |
| <b>Біоскрubber</b>                | Вода, активний мул                                                    | Циркуляція води          | 1) абсорбція в абсорбері водою;<br>2) деструкція в аеротенку.                     | Мінеральні речовини вносяться у воду |
| <b>Біореактор з омивним шаром</b> | Іммобілізовані на штучних носіях мікробні клітини                     | Циркуляція води          | 1) дифузія через водну плівку до мікроорганізмів;<br>2) деструкція в біошарі      | Мінеральні речовини вносяться у воду |

## **2. Системи очищення газоповітряних викидів біотехнологічних виробництв.**

Газоподібні відходи в процесах біологічної технології нечисленні в асортименті. Це визначається біохімічною сутністю реакцій, що каталізуються ферментами. Зазвичай енергетичним субстратом для біооб'єктів є вуглеводи. В аеробних і анаеробних умовах із них утворюється діоксид вуглецю.

Діоксид вуглецю, що виділяється, вловлюється та утилізується в харчовій промисловості як холодоагент.

Газоподібним відходом біотехнологічних виробництв, що базуються на використанні аеробних мікроорганізмів, є «відпрацьоване повітря». Воно не повинно

надходити в атмосферу без очищення і знешкодження. Відпрацьоване повітря при цьому найчастіше являє собою високодисперсний аерозоль, в якому дисперсною фазою є краплинки рідини і/або мікроорганізми. Швидкості падіння аерозольних частинок залежать від їх розмірів і зміщення повітряних потоків. Для деяких із них швидкості падіння наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Швидкості седиментації частинок (густина, г/см) із високодисперсних аерозолів (в'язкість повітря –  $1,82 \cdot 10^{-4}$  пуазів,  $t = 293$  К)

| Радіус частинок, мкм | Критерій Рейнольдса  | Швидкість седиментації, м/с | Броунівський рух, м/с |
|----------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 3                    | 0,366                | $0,11 \cdot 10^{-2}$        | $2,84 \cdot 10^{-4}$  |
| 1                    | $1,43 \cdot 10^{-2}$ | $1,3 \cdot 10^{-4}$         | $5,07 \cdot 10^{-6}$  |
| 0,3                  | $4,62 \cdot 10^{-2}$ | $1,39 \cdot 10^{-5}$        | $1,0 \cdot 10^{-5}$   |
| 0,1                  | $2,45 \cdot 10^{-5}$ | $2,23 \cdot 10^{-6}$        | $2,1 \cdot 10^{-5}$   |
| 0,03                 | $1,37 \cdot 10^{-6}$ | $4,16 \cdot 10^{-7}$        | $5,5 \cdot 10^{-5}$   |
| 0,01                 | $1,26 \cdot 10^{-7}$ | $1,14 \cdot 10^{-7}$        | $1,06 \cdot 10^{-4}$  |

Із таблиці 2 бачимо, що зі зменшенням розміру частинок їх седиментація помітно зменшується, але зростає броунівське зміщення. Ось чому високодисперсні аерозолі легко можуть переноситися повітряними потоками на великі відстані, і тому не виключений їх несприятливий вплив на чутливі контингенти осіб, які вдихають мікробні аерозолі. Відпрацьоване повітря, що містить мікроорганізми (наприклад, хвороботворні продуценти екзотоксинів), повинне бути термічно обробленим і лише після цього піддаватися фільтраційному очищенню. Під час реалізації біотехнологічних процесів необхідно здійснювати постійний (безперервний) контроль за якістю відпрацьованого повітря, що викидається в атмосферу. Багато біотехнологічних процесів відбуваються з виділенням тепла, яке може бути побічним продуктом біохімічних реакцій. Нерідко таке тепло втрачається і практично не використовується, лише в окремих виробництвах воно реутилізується.

Технологічні потоки викидів різних біотехнологічних підприємств дуже відрізняються за своїми фізико-хімічними властивостями й вмістом у них «біологічного фактора». Виходячи з цього, при створенні технічних систем локалізації викидів ураховують:

- 1) фізико-хімічні властивості потоків (температуру, вологість, рН, питому вагу та ін.);
- 2) кількісну та якісну характеристики біологічно активних частинок (фракційно-дисперсний склад, стійкість та ін.).

Основними газоповітряними викидами (ГПВ) біотехнологічних виробництв є аерозолі, нестабільні дисперсні системи, що складаються з дрібних твердих частинок (клітин, їх агрегатів) у рідкій фазі, завислі в газовому середовищі.

Усі організовані джерела газоповітряних викидів (ГПВ) від ферментерів, сепараторів, флотаторів, центрифуг, сушарок, пакувального відділення та іншого

технологічного обладнання оснащуються системами очищення, нерозривно пов'язаними з технологічними особливостями окремих стадій процесу.

Найбільш поширеними, апробованими методами очищення газоповітряних викидів (ГПВ) від біологічно активних частинок є фільтрація, теплове оброблення і «мокрі» системи очищення.

За своїм складом основна маса газоповітряних викидів (ГПВ) умовно може бути поділена на 2 групи:

- 1) ГПВ, що містять живі клітини мікроорганізмів, краплі культуральної рідини з продуктами метаболізму і піну;
- 2) ГПВ, що містять сухі клітини мікроорганізмів (білковий пил) або дрібні частинки цільового продукту.

Очищення газоповітряних викидів (ГПВ) першої групи передбачає наявність спеціального сепаратора для відділення крапель і піни з подальшим очищенням від клітин мікроорганізмів у скрубери Вентурі на 99,99%.

Очищення газоповітряних викидів (ГПВ) другої групи, де основним компонентом є білковий пил, вміст якого досягає 200–300 мг/м<sup>3</sup>, передбачає використання в технологічній схемі двоетапного скрубера Вентурі для забезпечення ефективного очищення до значення ГДК.

Під час очищення газових викидів основним завданням є руйнування аерозолі. Час руйнування аерозолів визначається швидкістю седиментації (осадження) дисперсних частинок або швидкістю їх коагуляції (збільшення за рахунок об'єднання частинок).

Більшість методів боротьби з аерозолями ґрунтується на інтенсифікації процесів злиття рідких частинок. Для цього часто використовують пористі керамічні або металеві елементи.

На першій стадії очищення газоповітряних викидів від ферментерів на початку відвідної труби застосовують фільтри, заповнені металевими стружками (тумановловлювачі) або керамічними кільцями Рашига, на яких відбувається часткове збільшення крапель аерозолі і повернення їх на стадію ферментації.

На стадіях ферментації та сепарації основними системами очищення повітря, що відходить від клітин мікроорганізмів, є скрубери Вентурі з краплевіддільником або двоступенева система, що складається зі скрубера Вентурі та сітчастого тумановловлювача.

Нержавіюча сітка трикотажного плетіння тумановловлювача розміщена перпендикулярно до руху газоповітряного потоку. Дрібні краплі аерозолі, що містять клітини промислового штаму, зіштовхуючись із сіткою, збільшуються і стікають у нижню частину апарата. Стабільність і ефективність роботи установки з тумановловлювачем досягається за рахунок безперервної регенерації сітки тумановловлювача без припинення основного технологічного процесу.

Під час додержання технологічного режиму, зокрема якості й кількості зрошувальної води, перепаду тиску за газовою фазою, при «мокрому» очищенні знижується концентрація мікробовмісних частинок у технологічних газах, що

відходять від ферментерів (при культивуванні дріжджів) у середньому на 4–5 порядків, забезпечуючи рівень, нижчий за  $10^2$  кл/м<sup>3</sup>, тобто нижчий, ніж ГДК клітин у повітрі робочої зони. Зона поширення клітин в основному обмежена відстанню 150–200 м від джерела викиду. Ефективність такої системи очищення становить 99,9%.

У біотехнологічній промисловості широко використовують розпилювальну сушарку. Розпилювальні сушарки являють собою вертикальний циліндричний апарат із конічним днищем. Вихідна суспензія або розчин за допомогою розпилювального пристрою диспергують на дрібні краплі діаметром 10–100 мкм, що призводить до розвитку міжфазової поверхні та інтенсивності випаровування вологи в потоці нагрітого сушильного агента (100–150°C).

Час перебування матеріалу в сушарці – 15–20 с. При цьому матеріал нагрівається до температури 40–60°C (не вищої, ніж температура мокрого термометра). На днище апарата осідає 70–80% висушених частинок, що відводяться шнеком або за допомогою пневмотранспорту на упаковку. Інша частина більш дрібних частинок виноситься з апарата сушильним агентом і вловлюється системою газоочисних установок (ГОУ).

Для одержання продуктів, в яких після висушування потрібно зберегти життєдіяльність мікроорганізмів і високу біологічну активність (хлібопекарські дріжджі, амінокислоти, антибіотики, ферменти та ін.), використовують більш м'які умови сушіння за температури 40–50°C. Оскільки за цих умов знижується інтенсивність випаровування вологи, то процес сушіння часто проводять під вакуумом.

Для забезпечення стерильності висушуваних продуктів сушильний агент (зазвичай повітря) перед поданням до сушильної камери необхідно очистити, наприклад стерилізувальною фільтрацією.

Для одержання продуктів, що не вимагають збереження життєдіяльності мікроорганізмів або забезпечення їх високої біологічної активності, використовують більш жорсткі, інтенсивні режими сушіння.

Для очищення газоповітряних потоків сушильних установок використовують різні технологічні рішення, що залежать від схеми процесів сушіння. Використовують і замкнений контур циркуляції теплоносія й повітря пневмотранспорту.

Очищення газоповітряних викидів після розпилювальних сушарок проводять також двома етапами: перший – «сухе» очищення в циклонах; другий – у скруберах Вентурі. Загальна ефективність такої системи становить у середньому 99,5%.

Щоб не допустити потрапляння готового продукту в атмосферне повітря, розроблено кілька технологічних схем процесу сушіння. Зокрема, розроблена сушильна установка, до якої входить конденсатор для виведення вологи, що випаровується. Це дозволяє повністю замкнути контур циркуляції за схемою: повітропідігрівач – сушильна камера – циклонна група – апарат «мокрого» очищення – конденсатор – підігрівач повітря (рис. 1).



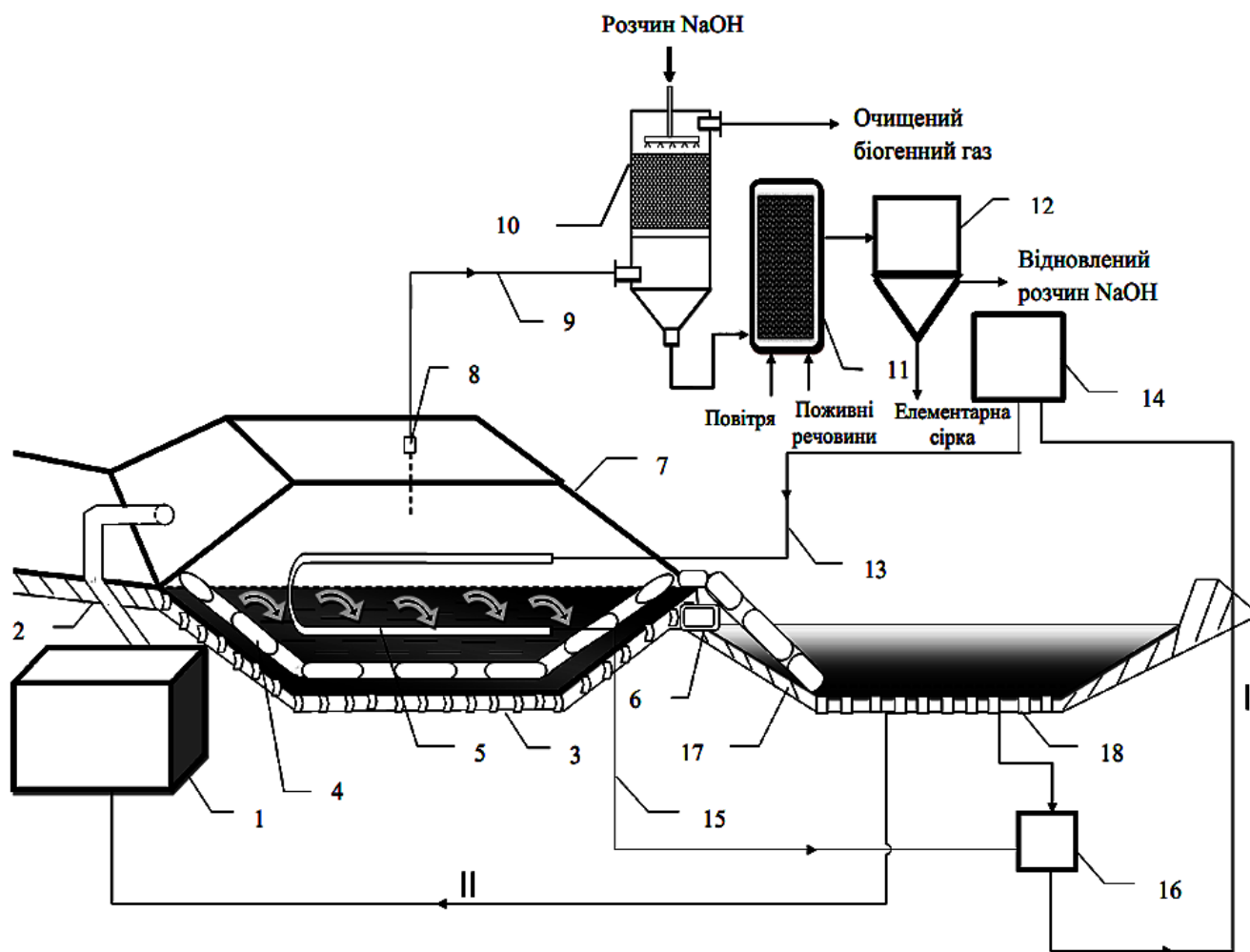


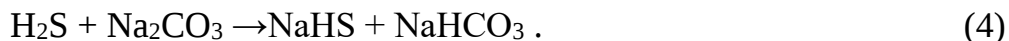
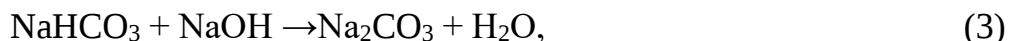
Рисунок 2 – Принципова технологічна схема біосульфідного знешкодження осаду стічних вод (Є. Ю. Черниш, 2014).

У теплообмінник (5) як теплоносій трубопроводом (13) надходить рідка фракція зброджених відходів, очищена до рівня, придатного для повторного використання, і підігріта у водогрійному котлі (14). Охолоджена в теплообміннику (5) рідка фракція трубопроводу (15) повертається через вузол (16), призначений для змішування потоків рідкої фракції, і по лінії I передавання її у водогрійний котел (14). Поділ зброджених відходів на тверду і рідку фракції реалізується на муловому майданчику (17) з ізольованим дном та дренажною системою (18).

Тверда фракція – екологічно чисте органо-мінеральне добриво. При цьому частина твердої фракції по лінії II подається на вході в біореактор (3) у накопичувальну ємність (1) як закваска, що містить сформовану сульфідогенну асоціацію мікроорганізмів.

Наступні реакції в скрубєрі відбуваються за подачі біогенного газу під тиском, вищим за атмосферний (до 75 барів) із використанням каустичної соди як розчинника:

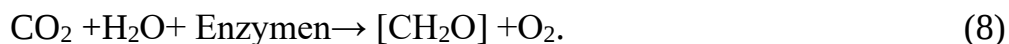




Розчинений водень сульфід (HS-) із скрубера подається в біофільтр, де за атмосферного тиску і в аеробних умовах у процесі метаболізму бактерій відбуваються такі реакції процесу біосульфізації:



Відзначимо, що обмежені можливості різних видів *Thiobacillus sp.* (наприклад, *Th. intermedius* і *Th. permetalibolus*) до зростання в автотрофних умовах пов'язані з можливостями цих бактерій використовувати вуглекислоту для утворення різних компонентів клітин:



На утворення сульфату натрію припадає менше ніж 5% від загального сульфідів. Переважно весь гідроген сульфід (95–96%) зазнає трансформації з утворень елементарної сірки.

### 3. Методи очистки ґрунту.

Ґрунт є важливим компонентом біосфери, що піддається техногенному забрудненню. Біля 50 % забруднень на Землі пов'язані з нафтою. Серед мікроорганізмів відомі активні деструктори нафтопродуктів, що належать до родів *Rhodococcus*, *Micrococcus*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*.

Зазвичай забруднення ґрунту починається з поверхні, далі політанти проходять крізь горизонти ґрунту до шару, що межує із водоносним горизонтом. Залежно від щільності забруднюючого матеріалу можливі різні варіанти процесу. Деякі компоненти можуть накопичуватись на поверхні водного середовища й мігрувати з ним, інші здатні розчинятись у ґрунтових водах. Такі компоненти, як смоли, здатні потрапляти до нижнього шару води та переноситись досить повільно. Тому існують різні механізми очистки.

Розроблено 5 основних *способів очистки забрудненого ґрунту*.

- 1) Ґрунт залишають на місці, відкачують ґрунтові води, які очищують, а потім їх знову повертають у ґрунт. При цьому в ґрунті можуть залишатись політанти з низькою розчинністю.
- 2) Ґрунт обробляють на місці шляхом внесення окиснювачів ( $\text{NO}_3$ ,  $\text{O}_2$ ), субстратів або емульсифікаторів для посилення переносу ліпофільних забруднень або їх доступність для біологічних об'єктів. Такий спосіб обробки є маловитратним, але триває декілька років.
- 3) Ґрунт видаляють і складають у купи або вали, крізь які встановлюють труби для аерації з метою інтенсифікації аеробних процесів розкладання. Така обробка теж триває декілька років і залежить від типу забруднення.
- 4) Ґрунт відділяють і промивають, інколи з додаванням поверхнево активних речовин. Екстраговані забруднення послідовно розкладаються шляхом біологічної очистки промивних вод.
- 5) Ґрунт видаляють повністю і прожарюють у спеціальних печах. Це найбільш дорогий спосіб очистки, який призводить до повної стерилізації ґрунту.

Вибір способу очистки ґрунту залежить від типу забруднення, площі й глибини його поширення. Наприклад, на ділянках, що забруднені такими дуже окисненими сполуками, як пентахлорфенол (застосовується при консервації деревини), нітроароматичні сполуки (використовують при отриманні вибухових речовин), алкани і алкени (хлороформ, тетрачлоретилен – використовують при хімічній очистці одягу, знежирення в промисловості) необхідно вносити донори електронів для посилення процесів відновлення. Такими донорами є метанол, етанол, меляса. У разі забруднення вуглеводнями такої необхідності нема.

Найбільш важко піддаються очищенню ґрунти, забруднені ароматичними вуглеводнями й рідкими вуглеводнями, оскільки вони практично нерозчинні у воді. Розчинність у воді є лімітуючим фактором розщеплення. Здатність певних сполук активно розкладатися мікроорганізмами також залежить від комплексоутворення. Так, комплексні сполуки розкладаються повільніше ніж малокомпонентні субстрати. Комплексні сполуки можуть частково перетворюватись у активовані (часто гідроксильовані) похідні, які ковалентно зв'язуються з органічною речовиною ґрунту, наприклад, із гуміновими речовинами ґрунту, і стають недоступними для мікроорганізмів.

### ***Види фітореMediaції.***

Сучасні фітореMediaційні технології можуть ґрунтуватися на різних методологічних підходах – це фітоекстракція, ризофільтрування, фітодеградація, фітоволоталізація тощо. Перш ніж використати ту або іншу технологію, варто провести ретельний аналіз місця, яке підлягає відновленню, установити тип токсичного з'єднання, його концентрацію, глибину проникнення в ґрунт, тип ґрунту, наявність ґрунтових вод, кількість опадів у період вегетації тощо.

**Фотоліз**, тобто розкладання речовин під дією світла, використовується для очистки ґрунтів від хлорпохідних бензолу в умовах їхнього поливу й додавання

осаду переробки стічних вод. Якщо в природних умовах витяг хлорпохідних на 50% досягається за 13–622 діб, то при фотолізі необхідний строк скорочується до 11–181 доби.

**Флотація** успішно застосована для відновлення якості землі, пошкодженої при пожежі великого гуртового складу-сховища пестицидів у Швейцарії. Після пожежі ділянка виявилася забрудненою різними хімічними сполуками, у тому числі органортутними. Селективною екскавацією було знято 14200 т забрудненого ґрунту, який відправили на спеціально побудований завод з її збагачення. Технологія очищення ґрунту включала його просівання й здрібнювання із флотацією, при якій було вилучено 95% забруднювачів. Очищений ґрунт повернули на колишнє місце. Забруднену фракцію обробили вапном, потім завантажили в контейнери й розмістили в підземних похованнях у Німеччині.

**Фітоекстракцію** звичайно використовують для очищення ґрунтів і водойм, забруднених важкими металами й радіонуклідами. Особливістю фітоекстракції є поглинання забруднювачів кореневою системою рослин разом з живильними речовинами й транслокація їх у надземні органи. По завершенню вегетації й транслокаційних процесів надземні органи рослин скошуюються й підлягають відповідній переробці. Наприклад, після озолення зібраної біомаси зола стає джерелом кольорових металів. Якщо одержання металів із золи обходиться дорожче їхньої собівартості, то біомасу рослин компостують. Ефективність фітоекстракції визначається коефіцієнтом біоаккумуляції, що дорівнює відношенню концентрації металів у рослинах до концентрації їх у ґрунті або в забрудненій воді.

**Ризофільтрація** – здатність рослин створювати навколо кореневої системи мікросередовище, що сприяє концентрації й проникненню речовин у рослини. Безумовна перевага ризофільтраційної технології полягає в її дешевизні й можливості використати широко розповсюджені рослини, у тому числі й деревні. Для застосування даної технології рослини повинні відповідати наступним вимогам: відрізнятися швидким ростом, інтенсивно накопичувати біомасу, мати потужну кореневу систему. В основному, це широколисті, однодольні багаторічні рослини, що добре ростуть в умовах і теплого, і холодного клімату. Цим вимогам відповідають багато водних і болотних рослин. Рослини перебувають у тісній взаємодії з мікроорганізмами, що заселяють ґрунт. Рослинний організм у ході фотосинтезу акумулює сонячну енергію у вуглеводах (цукрах). Від 10 до 20% всієї накопиченої в процесі фотосинтезу енергії витрачається рослиною на синтез і виділення речовин (цукру, спирти, органічні кислоти) у прикореневу зону, що сприяє розвитку мікроорганізмів. Тому безпосередньо поруч із поверхнею в одному кубічному сантиметрі кореня міститься близько 130 млрд. мікроорганізмів, а в 10 дм<sup>3</sup> їх присутність падає до 20 млрд. Найважливішим механізмом «фіторемедіації» ґрунту є біодеградація вуглеводнів нафти мікроорганізмами, чий розвиток стимулюється виділеннями коренів.

**Фітодеградація** або **фітотрансформація** – «внутрішнє» руйнування вуглеводнів рослиною – після поглинання розкладання їх у ході метаболічних

процесів або «зовнішнє», коли нафтопродукти розкладаються під дією корневих виділень – безсумнівно, один з основних технологічних прийомів фіторе mediaції. Метод заснований на можливості рослин разом із ґрунтовою мікрофлорою здійснювати ферментативне розщеплення органічних токсикантів ґрунту. У процесі деградації органічних речовин, відбувається видалення із ґрунту й неорганічних токсичних забруднювачів, таких як важкі метали й радіонукліди. Фітодеградаційна технологія виявилася ефективною у випадках забруднення ґрунту високими концентраціями аліфатичних, ароматичних, і поліциклічних вуглеводнів, фенолів, пестицидів тощо. Звичайно всі рослини володіють деградаційною токсикантною властивістю. Однак найбільш високі фітодеградаційні характеристики проявляють такі однолітні трав'янисті рослини, як вівсяниця, хрін, люцерна й деревні рослини: дуб, тополя, верба, кипарис. Багато водоростей так само активно метаболізують органічні токсиканти.

**Фітостабілізація** являє собою нагромадження, або іммобілізацію рослиною забруднюючих речовин із ґрунту або ґрунтових вод. При цьому можливі різні механізми процесів – абсорбція полютантів корінням й нагромадження їх в рослині. На жаль, із всіх видів рослин, що вивчалися, жоден не показав значного ефекту відносно нафти й нафтопродуктів, хоча деякі добре зарекомендували себе для видалення із ґрунту й ґрунтових вод важких металів.

#### ***Найбільш ефективні види фіторе mediaції.***

Більш ефективним є очищення, коли рослина сполучає здатність до фітовипару й фітодеградації, тоді в повітря виводяться тільки безпечні продукти розкладання нафтопродуктів.

У якості об'єднуючого, проміжного між вищевказаними властивостями є так званий гідравлічний контроль, коли рослина одержує доступ до ґрунтових вод і споживає разом з вологою забруднюючу речовину. Згодом вона може або руйнувати, або випаровувати забруднювач.

Здатність рослин до ризодеградації, ще називають ризосферно посиленою біодеградацією або рослинно посиленою біодеградацією. Принцип цього механізму полягає в тому, що розкладання забруднюючих вуглеводнів виробляється не самою рослиною, а мікроорганізмами, що живуть у безпосередній близькості до її корінь, тобто в ризосфері. Роль рослини полягає в значному посиленні ефективності роботи мікроорганізмів за рахунок біологічно активних корневих виділень, хоча результати окремих досліджень показали, що рослини крім стимуляції мікробів можуть і самі брати безпосередню участь у розкладанні вуглеводнів.