

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**« СУЧАСНІ МЕТОДИ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ
СОРБЕНТІВ »**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕКО-216
спеціальності 101 – Екологія

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Лебідь Я. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ЕХТЗД

Сакалова Г.В.

«10» червне 2025 р.

(прізвище та ініціали)

Рецензент: к.х.н., доцент каф. ЕХТЗД

Тітов Т.С.

(прізвище та ініціали)

«10» червне 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ЕХТЗД

к.т.н., доц. Іщенко В.А.

(прізвище та ініціали)

«10» червне 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Галузь знань 10 – Природничі науки

Спеціальність 101 – «Екологія»

Освітньо-професійна програма – Екологічна безпека та моніторинг довкілля

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕХТЗД

к.т.н., доцент

В.А. Іщенко

(підпис)

« 25 » березня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студенту

Лебідь Ярослав В'ячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «СУЧАСНІ МЕТОДИ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ СОРБЕНТІВ»

керівник роботи Сакалова Галина Володимирівна, д.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по ВНТУ від « 20 » березня 2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи « 10 » червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи

Таблиця 4.1 Сорбційна ємність змішаних сорбентів

4. Зміст текстової частини

1. Основи застосування сорбентів для контролю забруднення довкілля
2. Практичне застосування та ефективність сорбентів у контролі різних ~~видів~~ забруднень
3. Методи десорбції та регенерації сорбентів
4. Аналіз загроз водному середовищу України.

5. Перелік ілюстративного матеріалу

1. Основні характеристики біочару
2. Механізм адсорбції (фізична та хімічна)
3. Установка регенерації сорбентів СММ-4РП

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 25 » березня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
		початок	закінчення	
1	Дослідження використання сорбентів для контролю забрудень	25.03.2025	07.04.2025	викон
2	Аналіз нових методів і практик у регенерації та утилізації сорбентів	07.04.2025	27.04.2025	викон
3	Методи десорбції та регенерації сорбентів	27.04.2025	12.05.2025	викон
4	Узагальнення даних аналізу складання основних таблиць схем і рисунків	12.05.2025	26.05.2025	викон
5	Підготовка висновків, додатків і переліку літератури. Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.05.2025	05.06.2025	викон
6	Підготовка презентації та доповіді на захист БКР	05.06.2025	10.06.2025	викон

Студент _____
(підпис)

Лебідь Я.В
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Сакалова Г.В
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Лебідь Я. В. Сучасні методи повторного використання сорбентів.

Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 101 «Екологія», освітня програма «Екологічна безпека та моніторинг довкілля». Вінниця: ВНТУ, 2025. 79 с. На укр. мові. рис. 7; табл. 6., список використаних джерел містить 24 найменувань.

Метою даної роботи є систематизація та поглиблений аналіз методів повторного використання сорбентів, що застосовуються для контролю забруднення довкілля. Робота охоплює детальний огляд практичних аспектів регенерації та реутилізації різних типів сорбентів після їхнього використання для очищення води. Особлива увага приділяється питанням, пов'язаним з потенційним негативним впливом відпрацьованих сорбентів та інноваційним шляхам його мінімізації через впровадження циклічних технологій.

У теоретичній частині висвітлено принципи використання сорбентів для очищення води, повітря та ремедіації ґрунтів, а також розглянуто критерії вибору сорбентів та новітні матеріали, такі як металоорганічні та ковалентні органічні каркаси.

В аналітичній частині проведено аналіз практичного застосування сорбентів для контролю різних видів забруднень, включаючи очищення води від важких металів та органічних сполук, детоксикацію ґрунтів від нафтопродуктів, а також методи десорбції та регенерації сорбентів, зокрема хімічну регенерацію змішаного сорбенту (активованого вугілля та кізельгуру) для очищення промислових стічних вод.

У прикладній частині оцінено екологічну та економічну доцільність регенерації та повторного використання сорбентів, включаючи їх потенціал для застосування у сільському господарстві, та запропоновано рекомендації щодо інтеграції сорбційних технологій у стратегії захисту довкілля України.

Ключові слова: сорбенти, регенерація, очищення води, екологічна безпека, циклічна економіка, промислові стічні води.

ABSTRACT

Lebid Ya. V. Modern methods of sorbent reuse. The bachelor thesis consists of 79 pages of A4 format, on which there are 7 figures, 6 tables, the list of used sources contains 24 names.

The purpose of this bachelor's thesis is to systematize and deeply analyze methods for the reuse of sorbents applied in environmental pollution control. The work includes a detailed review of practical aspects of regeneration and reutilization of various types of sorbents after their use for water purification. Special attention is paid to issues related to the potential negative impact of spent sorbents and innovative ways to minimize it through the implementation of cyclic technologies.

The thesis also evaluates the effectiveness of regenerating a mixed sorbent (activated carbon and kieselguhr) used in the food industry and its subsequent application for treating industrial wastewater. The research confirmed the restoration of sorption capacity to 97-100% after chemical treatment and high efficiency of the regenerated sorbent in removing organic pollutants. The proposed approach demonstrates significant environmental and economic benefits, contributing to waste reduction, lower disposal and new material procurement costs, and opens prospects for beneficial use of spent sorbents in agriculture.

Keywords: sorbents, regeneration, water purification, environmental safety, circular economy, industrial wastewater.

ВІДГУК

на бакалаврську кваліфікаційну роботу студента 4 курсу,
групи ЕКО-216, спеціальності 101 «Екологія»

Лебідя Ярослава

на тему: «Сучасні методи повторного використання сорбентів»

Дослідження представлені у бакалаврській роботі Лебідя Я.В., спрямовані на детальний аналіз використання сорбційних матеріалів у технологіях очищення стічних вод, атмосферного повітря і ґрунтів та можливості ефективної утилізації таких сорбентів.

Матеріал дипломної роботи викладено системно та послідовно; при цьому наведено приклади перспективного використання відпрацьованих сорбентів та їх регенерації. Студентом було проведено аналіз та порівняння можливих методів розв'язання поставленої задачі але не обрано оптимальний варіант. Завдання студент отримав вчасно, етапи роботи виконав самостійно; окремі результати роботи були представлені на науково-практичній конференції з публікацією тез доповіді.

Робота має подальші перспективи, виконана на достатньому науково-методичному рівні і заслуговує позитивної оцінки при належному її захисті.

Науковий керівник:

д.т.н, проф.,

професор кафедри екології,

хімії та технологій

захисту довкілля

Вінницького національного

технічного університету



Галина САКАЛОВА

РЕЦЕНЗІЯ

на бакалаврську кваліфікаційну роботу
студента денної форми навчання групи ЕКО-216 спеціальності 101 «Екологія»
Лебідя Ярослава В'ячеславовича на тему
«Сучасні методи повторного використання сорбентів»

В своїй кваліфікаційній роботі студентом було систематизовано сучасні підходи до десорбції та регенерації сорбентів, зокрема такого сумішевого сорбенту, як активоване вугілля + кізельгур, відновленні його сорбційних властивостей після роботи з водними розчинами. Дана робота показує, що хімічна регенерація сумішевого сорбенту виявилася достатньо високоефективною для очищення стічних вод харчової промисловості, що підтверджує можливість її масштабного впровадження на підприємствах із відповідними умовами технологічного процесу.

Також в роботі проведений поглиблений аналіз методів повторного використання сорбентів, що застосовуються для контролю забруднення довкілля, детально розглянуті практичні аспекти регенерації та реутилізації різних типів сорбентів після їхнього використання для очищення води. Особлива увага приділяється питанням, пов'язаним з потенційним негативним впливом відпрацьованих сорбентів та інноваційним шляхам його мінімізації через впровадження циклічних технологій, що особливо актуально для збереження чистоти навколишнього середовища. Оцінка екологічної доцільності підтвердила зниження техногенного навантаження на довкілля за рахунок зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище та оптимізації управління побічними продуктами сорбційних процесів.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному порівняльному аналізі різних методів регенерації сорбентів та розробці практичних рекомендацій для їхнього багаторазового використання з урахуванням вартості матеріалів. Крім цього, робота має ще й практичне значення, що полягає в обґрунтуванні економічно вигідних і екологічно безпечних схем рециклінгу сорбентів, що сприятимуть підвищенню ефективності промислових систем очищення, оптимізації витрат підприємств та підтримці екологічної безпеки в Україні.

Робота структурно загальноприйнята, виконана на належному науково-методичному рівні та заслуговує на позитивну оцінку.

Рецензент

к.х.н., доц. кафедри ЕХТЗД


Тарас Тітов

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	4
Вступ.....	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ СОРБЕНТІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ	7
1.1. Очищення води.....	7
1.2. Очищення повітря	10
1.3. Ремедіація ґрунтів.....	13
1.4. Принципи вибору сорбентів для контролю забруднення довкілля ..	29
1.5 Висновки	32
2 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОРБЕНТІВ У КОНТРОЛІ КОНКРЕТНИХ ВИДІВ ЗАБРУДНЕНЬ.....	33
2.1. Очищення води.....	33
2.2. Очищення ґрунту та запобігання забрудненню ґрунтових вод	35
2.3. Успішні приклади застосування сорбентів для очищення води в промисловості та екології	37
2.4. Порівняльна характеристика сорбентів для видалення нафтових плівок	39
2.5 Висновки	40
3. МЕТОДИ ДЕСОРБЦІЇ ТА РЕГЕНЕРАЦІЇ СОРБЕНТІВ	42
3.1. Класифікація методів десорбції та регенерації.....	42
3.2. Фізичні методи регенерації та їх принципи застосування	43
3.3. Хімічні та термічні методи регенерації, принципи застосування.....	45
3.4. Економічна та екологічна доцільність регенерації та утилізації	48
4. АНАЛІЗ ЗАГРОЗ ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩУ УКРАЇНИ.....	54
4.1. Основні джерела та види забруднення водних ресурсів України.....	54

4.2. Застосування та регенерація сорбентів для очищення водних ресурсів України	56
4.3. Економічна доцільність регенерації та утилізації сорбентів	64
4.4. Перспективи застосування сорбційних технологій для очищення води в Україні та інтеграція в стратегії захисту довкілля	66
4.5 Висновки	67
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРАСТИНИХ ДЖЕРЕЛ	71
ДОДАТОК А	74
ДОДАТОК Б	75
ДОДАТОК В.....	76
ДОДАТОК Г	77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

ШКТ - Шлунково-кишковий тракт

MOFs - Металоорганічні каркаси (Metal-Organic Frameworks)

COFs - Ковалентні органічні каркаси (Covalent Organic Frameworks)

БЕТ - Теорія Брунауера-Емметта-Теллера (Brunauer, Emmett, Teller)

ORR - Реакція відновлення кисню (Oxygen Reduction Reaction)

OER - Реакція виділення кисню (Oxygen Evolution Reaction)

HER - Реакція виділення водню (Hydrogen Evolution Reaction)

LIBs - Літій-іонні батареї (Lithium-ion Batteries)

Вступ

Забруднення довкілля залишається однією з найгостріших глобальних проблем сучасності, що має руйнівний вплив на екосистеми та здоров'я людини. Зростаюча індустріалізація, урбанізація та інтенсивне сільське господарство призводять до накопичення токсичних речовин у водних об'єктах, ґрунтах та атмосферному повітрі. У цьому контексті розробка та впровадження ефективних, економічно вигідних та екологічно безпечних методів очищення є надзвичайно актуальною.

Сорбційні методи, що ґрунтуються на здатності певних матеріалів поглинати та утримувати шкідливі речовини, є високоефективними та широко застосовуються в різних галузях. Однак, традиційне використання сорбентів часто передбачає їхнє одноразове застосування з подальшою утилізацією, що призводить до накопичення вторинних відходів та значних економічних витрат.

Метою даної роботи є систематизація та поглиблений аналіз методів повторного використання сорбентів, що застосовуються для контролю забруднення довкілля. Особлива увага приділяється практичним аспектам регенерації та реутилізації різних типів сорбентів після їхнього використання для очищення води, а також інноваційним шляхам мінімізації негативного впливу відпрацьованих сорбентів через впровадження циклічних технологій.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасні методи десорбції та регенерації сорбентів, включаючи фізичні, хімічні та термічні підходи.
2. Дослідити ефективність хімічної регенерації відпрацьованої суміші сорбентів (активоване вугілля та кізельгур) та її застосування для очищення стічних вод харчової промисловості.
3. Оцінити екологічну та економічну доцільність повторного використання регенованих сорбентів.

4. Вивчити потенціал подальшого використання відпрацьованих сорбентів у сільському господарстві та будівельній галузі.
5. Розглянути законодавчу базу та перспективи застосування сорбційних технологій в Україні в контексті циркулярної економіки.

Об'єктом дослідження є процеси сорбції та десорбції, а також методи регенерації та утилізації сорбентів.

Предмет дослідження - ефективність та доцільність повторного використання сорбентів для контролю забруднення довкілля, зокрема водного середовища.

Наукова новизна полягає систематизації та комплексному аналіз сучасних методів регенерації сорбентів, включаючи новітні підходи.

Практичне значення полягає в розробці та обґрунтуванні підходів до раціонального використання відпрацьованих сорбентів, що сприятиме зниженню техногенного навантаження на довкілля, оптимізації витрат підприємств та впровадженню принципів циркулярної економіки в Україні.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ СОРБЕНТІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ

1.1. Очищення води

Водні системи зазнають впливу різноманітних забруднювачів – від важких металів (Cr, Pb, Hg, Cd тощо) до органічних сполук (фармацевтичних, пестицидів, барвників та нафтопродуктів). Сорбційні методи є одними з найбільш ефективних для видалення таких домішок. Зокрема, як показали дослідження, сорбенти на основі магнетиту та модифікованого вугілля здатні вилучати іони важких металів із високою сорбційною ємністю (деякі зразки магнетиту досягають 300–550 мг/г за міддю та цинком при оптимальному рН).[1] Ефективність сорбції зазвичай зростає при підвищенні рН середовища, що зумовлено гідролізом іонів металів і зміною поверхневої хімії сорбенту. Наприклад, дослідники встановили, що збільшення співвідношення Fe(II)/Fe(III) у магнетиті підвищує сорбційну ємність, а модифікація магнетиту тіосемікарбазидом чи сульфідом натрію дозволяє знизити залишкові концентрації металів до мкг/дм³. [1]біоча Основні типи сорбентів для водоочищення включають активоване вугілля, природні цеоліти, біочар (тверде деревне вугілля), іонообмінні смоли та новітні наноматеріали (наприклад, MOF, нанокомпозити). Активоване вугілля широко використовується для поглинання органічних забруднювачів і хімічних сполук завдяки своїй великій поверхні й пористості. Біочар, отриманий з біомаси, суттєво знижує біодоступність важких металів у ґрунтах і воді: він є економічно ефективним та екологічно безпечним рішенням для ремедіації водних систем. Наприклад, біочар демонструє високу спорідненість до Cd, Cu, Pb, Ni завдяки поєднанню електростатичної адсорбції та осадження солей (карбонати, фосфати) [2] . Цеоліти володіють іонообмінними властивостями і здатні захоплювати катіони важких металів (зокрема Pb, Zn), що підтверджено зниженням вмісту свинцю на 30 % при їх застосуванні на кислих ґрунтах. [3] Технічна реалізація сорбційного очищення води зазвичай передбачає обробку

стічних та питних вод у фільтрах, колонках і контактних резервуарах. Після проходження води через шар сорбенту показником ефективності служать ступінь видалення домішок та кінцева концентрація забрудників. Дослідження підтверджують, що сорбційні технології мають високу ефективність і можуть застосовуватися на різних етапах водоочищення. Після насичення сорбенту його регенерують або утилізують згідно з нормами. Таким чином, сорбенти забезпечують комплексну очистку води від шкідливих речовин, доповнюючи традиційні методи (коагуляція, біоочищення тощо) і сприяючи досягненню нормативів якості води.[4]

Типи забруднювачів води (полютанти):

Вода може бути забруднена різноманітними речовинами, для видалення яких застосовуються специфічні сорбенти та механізми:

Важкі метали: Іони важких металів, такі як мідь, цинк, свинець, кадмій, хром, миш'як, ртуть та залізо, є одними з найтоксичніших забруднювачів води. Для їх видалення ефективно використовуються іонообмінні матеріали, зокрема цеоліти та синтетичні іонообмінні смоли (наприклад, КУ-2-8, КУ-23, АВ-17-8). Цеоліти, завдяки своїй пористій структурі та здатності до селективного іонного обміну, можуть видаляти радіонукліди та аміак. Активоване вугілля також застосовується Фосфорвмісні вуглецеві сорбенти, отримані з сільськогосподарських відходів (кукурудзяні качани, кісточки фруктів), демонструють підвищену сорбційну здатність до іонів заліза та міді. [4]

Органічні сполуки: Феноли, алкілбензолсульфонати (АБС), пестициди (зокрема фосфорорганічні препарати), барвники та фармацевтичні препарати є поширеними органічними забруднювачами. Активоване вугілля є класичним адсорбентом для видалення фенолів, АБС та пестицидів з водних розчинів завдяки його високій поверхневій активності та гідрофобності. Бентоніт також може застосовуватися для очищення води від АБС. Сильноосновні аніоніти, такі як АВ-17, є перспективними для видалення пестицидів. [5]

Фосфати та нітрати: Ці сполуки часто є результатом сільськогосподарської діяльності та скидів стічних вод, що призводить до евтрофікації водойм. Цеоліти, зокрема модифіковані, є ефективними для видалення фосфат-іонів. Іонітні фільтри також використовуються для видалення нітратів.

Інші забруднювачі: Вугілля та бентоніт можуть застосовуватися для видалення АБС, а гідроксид алюмінію або заліза — у вигляді пластівців. Силікагель використовується для осушення рідин та поглинання парів органічних речовин. [7]

Механізми дії:

Адсорбція: Це поверхнєве явище, при якому забруднювачі (сорбати) притягуються до поверхні сорбенту. Активоване вугілля, силікагелі та алюмогелі є типовими адсорбентами. Для активованого вугілля ефективність пояснюється його розвиненою пористою структурою та великою площею поверхні.

Іонний обмін: Цей механізм передбачає обмін іонами між сорбентом та розчином. Він є основним для іонообмінних смол та цеолітів, які поглинають катіони або аніони з розчину, вивільняючи еквівалентну кількість іонів іншої природи. Фосфорвмісні вуглецеві сорбенти також демонструють катіонообмінну здатність.

Хемосорбція: У цьому випадку між сорбентом та сорбатом утворюються хімічні сполуки, що робить процес, як правило, необоротним. Наприклад, поглинання фосфатів цеолітами може відбуватися за механізмом хемосорбції після співосадження іонів.

Комплексоутворення: Деякі іонообмінні смоли та спеціально модифіковані сорбенти здатні утворювати координаційні сполуки, зокрема хелатні комплекси, з іонами металів.

Абсорбція: Поглинання речовин усім об'ємом сорбенту.

Поточний стан та перспективи: Сорбційні методи очищення води є високоефективними, особливо для видалення важких металів та органічних

забруднювачів навіть у низьких концентраціях. Вони мають низькі експлуатаційні витрати та швидку швидкість видалення, а також не утворюють побічних продуктів, таких як осад стічних вод, на відміну від коагуляції та флокуляції. Використання природних матеріалів, таких як цеоліти та глини, є економічно вигідним та екологічно безпечним. Дослідження підтверджують ефективність кліноптилоліту для одночасного видалення аміаку та фосфатів зі стічних вод. [6]

Проте, для досягнення дуже низьких концентрацій забруднюючих іонів або повного знесолення води, часто необхідні іонообмінні методи. Розвиток нових, недорогих та ефективних сорбційних матеріалів, а також інтеграція сорбції з іншими технологіями водоочищення є ключовими напрямками для оптимізації якості води та забезпечення сталого розвитку.

1.2. Очищення повітря

Промислові та побутові джерела забруднюють атмосферу газоподібними сполуками (SO_2 , NO_x , NH_3), органічними випарами (VOC – леткі органічні сполуки), запахами та пиловими домішками. Сорбенти ефективно застосовуються у стільцях зворотного потоку, фільтраційних рукавах та носіях каталізаторів для зв'язування таких забруднювачів. Наприклад, активоване вугілля широко використовується в системах очищення повітря (масках, фільтрах вентиляції, газоочисних установках) для адсорбції бензолу, толуолу, формальдегіду та інших шкідливих сполук. Цеоліти і карбонати – сорбенти з високою молекулярною селективністю – застосовують для вилучення аміаку та сірководню в аграрному виробництві та очистці стоків. Зокрема, у дослідженнях показано, що кубинський цеоліт вимагав лише 5 г матеріалу для поглинання виділеного аміаку з відходів птахівництва (проти 20 г басальтового цеоліту),[8] що пояснюється його більшою питною поверхнею. Новітні пористі матеріали, такі як метал-органічні каркаси (MOF), мають надзвичайно велику площу поверхні і уже продемонстрували відмінні результати у видаленні газоподібних забруднювачів (наприклад, CO_2 і NH_3).[8] Біочар також

використовується в системах очистки повітря: експерименти показали, що гранульований біочар може зменшувати загальні емісії H_2S і NH_3 з тваринницьких відходів на $\sim 70\%$. [2] Це підкреслює перспективність «циклічної економіки», коли відходи переробляються і повторно використовуються для поліпшення екологічного балансу. [23] Очищення повітря сорбентами зазвичай здійснюється у контурі вентиляції або газоочищення установок. Після проходження забрудненого потоку через сорбційний фільтр контролюється рівень залишкового забруднення, а також час початку «пробою» (пробивання забрудника крізь фільтр). Застосування сорбентів дає змогу значно знизити концентрацію шкідливих газів: наприклад, зазначається зменшення токсичності повітря на птахофермах завдяки адсорбції аміаку та сірководню, що сприяє покращенню гігієнічних умов. Як наслідок, сорбційні фільтри забезпечують ефективну нейтралізацію різних атмосферних забруднювачів за помірних технічних витрат, проте їх довгострокове застосування потребує регулярної заміни або регенерації сорбенту. [9]

Очищення повітря від шкідливих домішок є критично важливим для захисту здоров'я людини та довкілля. Сорбційні методи ефективно застосовуються для видалення газоподібних забруднювачів, запахів та твердих частинок.

Типи забруднювачів та сорбенти:

Газоподібні забруднювачі та запахи: До них належать леткі органічні сполуки (ЛОС), оксиди сірки (SO_x), оксиди азоту (NO_x), чадний газ (CO), фтористий водень (HF), хлористий водень (HCl), аміак, діоксид сірки, пари ртуті, сірководень, формальдегід, хлор, ціаністий водень.

Активоване вугілля: Є найпоширенішим адсорбентом для очищення повітря. Завдяки своїй високій пористій поверхні, воно ефективно поглинає шкідливі гази та частинки, а також неприємні запахи.

Імпрегноване активоване вугілля: Для видалення специфічних, хімічно активних домішок, таких як аміак, діоксид сірки, пари ртуті, сірководень,

формальдегід, хлор та ціаністий водень, використовується активоване вугілля, імпрегноване спеціальними хімічними реагентами. Імпрегнація нітратом срібла, наприклад, може надавати антибактеріальний захист.

Молекулярні сита (цеоліти): Цеоліти ефективно використовуються для осушення повітря та газів, особливо коли потрібна низька точка роси (нижче - 40 °C). Вони володіють високою адсорбційною здатністю до води завдяки своїй пористій структурі. [10]

Алюмогелі (активованій оксид алюмінію): Застосовуються для осушення газоподібних середовищ, особливо коли потрібна точка роси вище - 40 °C.

Хлорид кальцію: Використовується для статичного осушення та видалення запахів з газоподібних середовищ, зокрема природних та нафтових газів.

Тверді частинки: Пил, аерозолі та інші дрібні частинки також є значними забруднювачами повітря.

НЕРА-фільтри: Ці фільтри, хоча і не є сорбентами в класичному розумінні, використовують сорбційні механізми (дифузію, зачеплення, інерцію, ситовий ефект) для ефективного видалення твердих частинок з повітря.

Глинисті сорбенти: Деякі шаруваті та стрічково-шаруваті глинисті сорбенти, такі як бентонітові та палигорськітові глини, а також аморфні природні силікати (діатоміти, опоки), можуть застосовуватися для поверхневої адсорбції та іонообмінних процесів.

Механізми дії:

Адсорбція: Основний механізм для активованого вугілля та молекулярних сит. Забруднюючі гази та пари поглинаються на поверхні пористих матеріалів. [12]

Абсорбція (хемосорбція): Процес, при якому газоподібні домішки розчиняються у рідкому абсорбенті або вступають у хімічну реакцію з

поглиначем. Імпрегноване вугілля використовує цей механізм, коли хімічні реагенти на поверхні реагують із сорбентом.

Молекулярний обмін: Характерний для силікатних сорбентів опалового типу, де адсорбційні властивості зумовлені поверхнево-гідроксильними активними центрами.

Іонний обмін: Властивий деяким глинистим сорбентам, де відбувається заміщення іонів на поверхні сорбенту іонами розчиненої речовини.

Фізичні механізми (для твердих частинок):

Інерція: Великі частинки через свою масу відхиляються від потоку повітря та осідають на фільтрі.

Дифузія: Дрібні частинки рухаються хаотично та осідають на фільтрі.

Зачеплення (Interception): Частинки, що рухаються вздовж потоку, зачіпляються за волокна фільтра.

Ситовий ефект (Sieving): Частинки більшого розміру затримуються порами фільтра.

Поточний стан та перспективи:

Сучасні технології очищення повітря активно розвиваються, інтегруючи сорбційні методи з іншими підходами. Металоорганічні каркаси (MOFs) та ковалентні органічні каркаси (COFs) демонструють значний потенціал для уловлювання вуглецю та видалення забруднювачів повітря. [17] Їхня регульована пористість та функціональні можливості дозволяють створювати високоефективні та селективні матеріали для очищення газових сумішей. Однак, для їх широкого впровадження існують виклики, пов'язані зі складністю масштабованого синтезу та стабільністю в промислових умовах.

1.3. Ремедіація ґрунтів

Забруднення ґрунтів важкими металами, органічними пестицидами, нафтовими виливами та радіонуклідами створює довготривалі екологічні ризики. Сорбенти впроваджують до ґрунту для стабілізації або депонування політантів: після обробки такі речовини залишаються міцно зв'язаними з

матеріалом сорбенту, а біодоступність токсичних компонентів знижується. Біочар є одним із найбільш досліджених матеріалів для цієї мети: дослідники показали, що внесення біочару знижує рухомість іонів важких металів у ґрунті та значно стимулює ріст рослин і активність ґрунтових мікроорганізмів. Так, джерела повідомляють про утримання Cd, Cu, Pb, Ni на матриці біочару шляхом освіти карбонатних та фосфатних осадів та обміну йонами. Крім того, біочар покращує структуру ґрунту, підвищує його вологоємність і родючість, що опосередковано сприяє ремедіації після пожеж чи забруднення (стимулює самовідновлення ґрунтового покриву). До поширених природних сорбентів відносяться також цеоліти (утворені вулканічними породами алюмосилікати) і глинисті мінерали. Цеоліти, маючи велику обмінну ємність, вивільняють в ґрунті на заміну забрудненим іони сілікатів та алюмосилікатів, тим самим стабілізуючи токсиковані елементи. У навчальному виданні наголошується, що цеоліти в кислому ґрунті, забрудненому свинцем, дозволяли знизити концентрацію Pb на 30 %. Аналогічно, фосфоритні та базальтові туфи можуть захоплювати радіонукліди й метали, адсорбуючи їх на поверхні та переводячи в нерухому форму. Активоване вугілля і його похідні застосовують для адсорбції органічних токсинів (ПАР, нафтоалкоголі) у забрудненому ґрунті. Практична ремедіація включає локальні обробки забруднених ділянок (відсікання проблемних шарів, внесення сорбенту при оранці, глибоку культивування) та системні методи (збагачення компосту сорбентами, влаштування штучних фільтрів у зоні фільтрації підземних вод). По завершенні сорбційної стабілізації ґрунт перевіряють на відсутність мігруючих форм забруднень, а якість земляних робіт повинна відповідати нормативам безпеки. Слід зазначити, що природні сорбенти (біочар, цеоліти) зазвичай малотоксичні та сприяють екологічній реабілітації, проте потребують контролю за вмістом адсорбованих поллютантів для попередження зворотного викиду.

Ремедіація ґрунтів, тобто їх очищення та відновлення, є життєво важливою для сільського господарства та екологічної безпеки.[11] Сорбенти відіграють значну роль у знешкодженні різноманітних забруднювачів, що потрапляють у ґрунт.

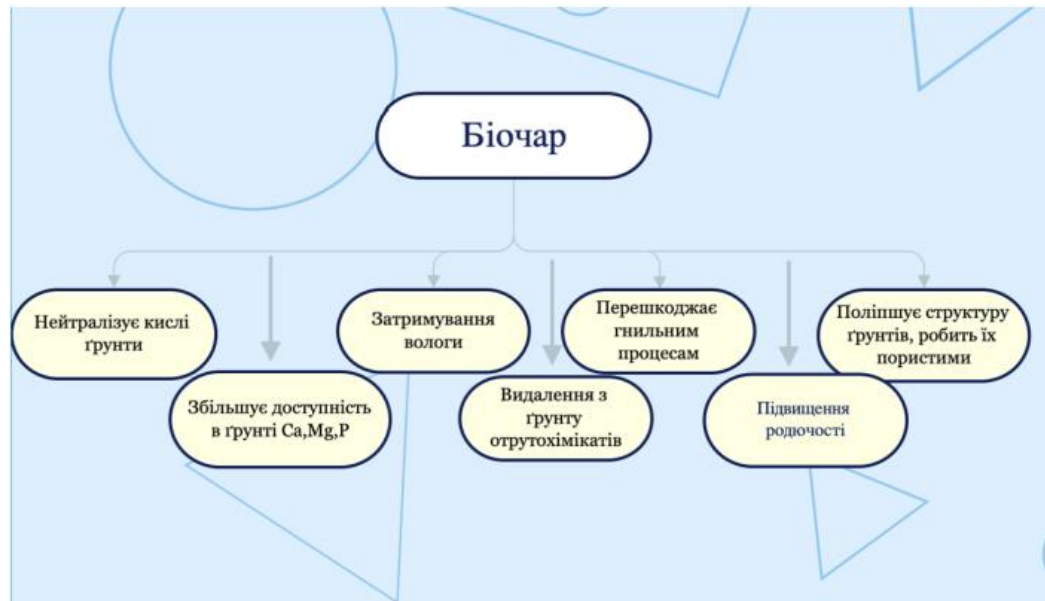


Рисунок 1.1 – Основні характеристики біочару

Типи забруднювачів та сорбенти:

Ґрунти можуть бути забруднені важкими металами, нафтопродуктами, пестицидами, вибуховими речовинами та іншими небезпечними сполуками, особливо внаслідок збройних конфліктів та інтенсивної хімізації сільського господарства.

Важкі метали: Свинець, кадмій, нікель, цинк, мідь, хром та інші важкі метали є токсичними для рослин, пригнічуючи їх розвиток та порушуючи фотосинтез.

Цеоліти: Ефективно видаляють важкі метали з ґрунту завдяки своїм іонообмінним властивостям, одночасно покращуючи водний та поживний баланс, збагачуючи ґрунт корисними катіонами (калій, кальцій, магній) та підвищуючи ефективність добрив. Вони також допомагають стабілізувати ґрунт та запобігати ерозії.

Глинисті мінерали: Такі як бентонітові та палигорськітові глини, глауконіт, вермикуліт, діатоміти та опоки, є хімічно реактивними неорганічними фазами ґрунтів. Вони володіють сорбційною та іонообмінною здатністю, впливаючи на пористість, розмір пор та обмінну спроможність ґрунту.

Біовугілля (біочар): Виробляється шляхом піролізу біомаси. Воно покращує фізичні, хімічні та біологічні властивості ґрунту, роблячи його пухким та пористим, збільшуючи вміст органічного вуглецю та корисної мікрофлори. Біовугілля знижує кислотність ґрунту, виводить токсичні речовини та підвищує біологічну активність, сприяючи розвитку кореневої системи рослин та засвоєнню поживних речовин.

Активоване вугілля: Може додаватися до ґрунту для ремедіації, проте важливо дотримуватися дозування, оскільки надмір може призвести до недостатньої доступності деяких мінералів для рослин.

Нафтопродукти та поліароматичні вуглеводні (ПАВ): Розливи нафти становлять високий екологічний ризик.

Сорбенти з перероблених полімерних відходів: Дослідження показують, що механічно перероблені побутові полімерні відходи (ПЕТ, ПВХ, суміші ПЕ+ПП) можуть бути ефективними нафтовими сорбентами, значно перевершуючи природні за ефективністю. Найкращі сорбційні властивості демонструють суміші ПЕ+ПП з оптимальним розміром частинок.

Біовугілля: Також ефективно для виведення токсичних речовин, включаючи нафтопродукти, з ґрунту.

Пестициди: Широкомасштабна хімізація сільського господарства чинить великий вплив на склад ґрунту.

Іонообмінні смоли: Застосовуються для очищення ґрунтів.

Колоїдні сорбенти: Наприклад, кополімер на основі мікробного полісахариду (енпосану) та поліакрилу (КС-1), можуть використовуватися як комбінований меліорант.

Механізми дії:

Адсорбція та іонний обмін: Основні механізми, за допомогою яких сорбенти зв'язують забруднювачі на своїй поверхні або обмінюються іонами з ґрунтовим розчином. Цеоліти та глинисті мінерали активно використовують іонний обмін для видалення важких металів та утримання поживних речовин.

Комплексоутворення та хелатування: Деякі сорбенти, або додані реагенти, можуть утворювати нерозчинні комплекси з металами, зменшуючи їх доступність.

Покращення фізико-хімічних властивостей ґрунту: Біовугілля та цеоліти покращують структуру ґрунту, його водо- та повітропроникність, збільшують місткість катіонного обміну, знижують кислотність та утримують вологу. Це сприяє стабілізації забруднювачів та зменшенню їх міграції.

Стимуляція біологічної активності: Біовугілля підвищує вміст гумусу та корисної мікрофлори, прискорюючи розкладання органіки та зменшуючи викиди парникових газів.

Фіторе mediaція: Хоча це не є суто сорбційним методом, він часто інтегрується з сорбентами. Фіторе mediaція базується на природних фізіологічних властивостях рослин деконтамінувати ґрунти, забруднені металами та органічними сполуками, шляхом акумуляції, деградації, стабілізації, трансформації та випаровування забруднювачів.

Поточний стан та виклики:

Ефективність сорбентів у ремедіації ґрунтів є високою, проте існують виклики, пов'язані з необхідністю утилізації відпрацьованих сорбентів, що накопичують токсичні речовини. Для синтетичних сорбентів з полімерних відходів важливо використовувати мінімальні кількості для максимальної ефективності, щоб уникнути вторинного забруднення та проблем з утилізацією. Дослідження продовжуються щодо впливу війни на ґрунти та розробки програм їх відновлення.

Сорбенти класифікуються за численними критеріями, що відображає їхню функціональну спеціалізацію та різноманітність застосувань. (!)

За механізмом дії

Адсорбенти: Поглинають речовини на своїй поверхні. До них належать активоване вугілля, силікагелі, цеоліти, алюмогелі.

Абсорбенти: Поглинають речовини у всьому об'ємі. Прикладом є харчові волокна.

Іонообмінні матеріали: Здійснюють обмін іонами. Цеоліти та синтетичні іонообмінні смоли є поширеними прикладами.

Сорбенти з каталітичними властивостями: Поєднують сорбцію з каталітичною активністю.

Сорбенти комплексної дії: Поєднують кілька механізмів сорбції.

Комплексоутворювачі: Містять функціональні групи, здатні утворювати координаційні сполуки, в тому числі хелатні комплекси, з сорбованими іонами металів.

За хімічною структурою та походженням

Вуглецеві ентеросорбенти: На основі активованого вугілля, що отримується з деревини, шкаралупи кокосового горіха та фруктових кісточок.

Силікатні сорбенти: Включають силікагелі, цеоліти, аеросили, глини, діоксид кремнію.

Алюмогелі (оксидні неорганічні сорбенти): Наприклад, активований оксид алюмінію.

Природні органічні: На основі харчових волокон, гідролізного лігніну, хітину, пектинів та альгінатів.

На основі природних та синтетичних смол, синтетичних полімерів та неперетравлюваних ліпідів:

Органомінеральні та композиційні сорбенти:

Комбіновані: До складу яких можуть входити два і більше типів зазначених ентеросорбентів.

За формою та фізичними властивостями (для ентеросорбентів)

Сорбенти доступні у різних лікарських формах та фізичних станах: гранули, порошки, таблетки, капсули, пасти, гелі, зависі, колоїди,

інкапсульовані матеріали, харчові добавки, волокна. Вони можуть мати вигляд пористих гранул або володіти високою здатністю вбирати воду.

За вибірковістю дії:

Селективні: Вибіркові моно-, бі-, поліфункціональні сорбенти, що активні лише щодо певних компонентів.

Неселективні: Поглинають широкий спектр речовин.

За способом застосування (для медичних сорбентів)

Для зовнішнього застосування: У вигляді пудри-присипки або тканинних різновидів (наприклад, сорбент тканинний вуглецевий).

Внутрішньовенні сорбенти: Призначені для плазмо- та гемосорбції.

Пероральні сорбенти (ентеросорбенти): Залишаються найбільш відомими та універсальними на сьогодні для прийому всередину.

Багатомірність класифікації сорбентів відображає їхню функціональну спеціалізацію. Сорбенти є високоспеціалізованими матеріалами, розробленими для конкретних завдань, і їхня ефективність залежить від медичних ентросорбентів ключовими є нетоксичність, безпечність для слизових оболонок, висока сорбційна ємність до токсинів та легка евакуація з організму. Для осушувачів важливі висока адсорбційна здатність до води, термостійкість та легкість регенерації. Це означає, що "ідеальний" сорбент є контекстно-залежним поняттям, і його дизайн вимагає врахування всіх цих аспектів одночасно. Такий комплексний підхід до класифікації та дизайну сорбентів є основою для інновацій у цій галузі. Він дозволяє не тільки оптимізувати існуючі матеріали, але й створювати нові, гібридні сорбенти, які поєднують бажані властивості для вирішення складних завдань, наприклад, сорбенти з каталітичними властивостями або комплексоутворювачі. Це є рушійною силою для прогресу в таких галузях, як екологія, медицина та промисловість.

Для систематизації інформації про різноманітність сорбентів та їхніх властивостей, детальна класифікація представлена в наступній таблиці:

Таблиця 1.1 - Детальна класифікація сорбентів

Критерій класифікації	Категорія	Опис / Ключові характеристики	Приклади
За механізмом дії	Адсорбенти	Поглинання речовин на поверхні сорбенту.	Активоване вугілля, силікагелі, цеоліти, алюмогелі.
	Абсорбенти	Поглинання речовин у всьому об'ємі сорбенту.	Харчові волокна.
	Іонообмінні матеріали	Обмін іонами між сорбентом та розчином.	Цеоліти, синтетичні іонообмінні смоли.
	Сорбенти з каталітичними властивостями	Поєднують сорбцію з каталітичною активністю.	Спеціально модифіковані матеріали.
	Сорбенти комплексної дії	Поєднують кілька механізмів сорбції.	Деякі комбіновані препарати.
	Комплексоутворювачі	Утворюють координаційні сполуки з сорбованими іонами.	Сорбенти з функціональними групами, що утворюють хелати.
За хімічною структурою та походженням	Вуглецеві	На основі активованого вугілля, висока сорбційна площа.	Активоване вугілля (Сорбекс).
	Силікатні	На основі кремнію, гідрофільні, пористі.	Силікагелі, цеоліти, аеросили, глини, діоксид кремнію.
	Алюмогелі (оксидні неорганічні)	На основі оксиду алюмінію, пористі, термостійкі.	Активованний оксид алюмінію.

	Природні органічні	На основі рослинних компонентів, харчових волокон.	Харчові волокна, гідролізний лігнін, хітин, пектини, альгірати.
	Синтетичні полімери та смоли	На основі синтетичних полімерів, смол, ліпідів.	Полістирольні волокна, синтетичні смоли.
	Органомінеральні та композиційні	Гібридні матеріали, що поєднують органічні та неорганічні компоненти.	Ентеросгель.
	Комбіновані	Містять два і більше типів сорбентів.	Комбіновані ентеросорбенти.
За формою та фізичними властивостями	Гранули	Зручні для дозування, можуть мати пористу структуру.	Активоване вугілля в гранулах, цеоліти.
	Порошки	Швидка дія, висока дисперсність.	Активоване вугілля в порошку.
	Таблетки/Капсули	Зручність прийому, захист діючої речовини.	Активоване вугілля в таблетках/капсулах, силікатні сорбенти.
	Паста/Гелі/Зависі/Колоїди	Зменшення подразнюючої дії, легкість застосування.	Ентеросгель.
За вибірковістю дії	Селективні	Поглинають лише певні речовини, моно-, бі-, поліфункціональні.	Спеціалізовані сорбенти для важких металів, біоспецифічні сорбенти.

	Неселективні	Поглинають широкий спектр речовин.	Більшість активованого вугілля.
За способом застосування (медичні)	Для зовнішнього застосування	Використання на шкірі або слизових оболонках.	Пудра-присипка, тканинний вуглецевий сорбент.
	Внутрішньовенні	Для очищення крові (гемо- та плазмосорбція).	Сорбенти для екстракорпоральної детоксикації.
	Пероральні (ентеросорбенти)	Для прийому всередину, діють у шлунково-кишковому тракті.	Активоване вугілля, силікагелі, харчові волокна.

Основні типи сорбентів та їх застосування

Різноманітність сорбентів дозволяє застосовувати їх у широкому спектрі галузей. Розглянемо основні типи та їхні характерні властивості.

Активоване вугілля

Активоване вугілля є найвідомішим представником адсорбентів. Воно володіє великою поверхневою активністю та високою сорбційною здатністю, з розвиненою сорбційною площею понад 1500–1800 м²/г. Завдяки пористій гранульованій структурі, активоване вугілля ефективно поглинає токсичні речовини, солі важких металів, алкалоїди, лікарські препарати та гази з травного тракту, сприяючи їх виведенню з організму. Воно нетоксичне, не абсорбується та добре виводиться кишечником. Активоване вугілля також може частково відновлюватися промиванням зворотним струмом води.

Незважаючи на високу ефективність, активоване вугілля має певні обмеження. Воно сорбує не тільки токсичні, а й корисні речовини. Таблетована форма має меншу адсорбційну спроможність порівняно з порошком. Частинки вугілля можуть мати гострі краї, що несе ризик травмування слизової шлунково-кишкового тракту.

Активоване вугілля широко використовується в медицині як ентеросорбент при харчових токсикоінфекціях, гострих отруєннях, диспепсії, метеоризмі. Воно також застосовується для очищення водних розчинів, включаючи очищення антибіотиків та гліцерину. Сучасні форми, такі як гранульоване вугілля в капсулах (наприклад, Сорбекс), мають значно більший сорбційний ресурс, забезпечують тривалу дію в травному тракті, захищають слизову ШКТ від механічного подразнення та збільшують біодоступність діючої речовини.



Рисунок 1.2 - Активоване вугілля

Силікагелі

Силікагель є висушеним твердим гелем-адсорбентом, отриманим з перенасичених розчинів кремнієвих кислот. Він представлений високопористими гранулами, хімічно є діоксидом кремнію (SiO_2) з величезною поверхнею, що складається з SiOH груп, які виступають як активні центри. Силікагель є гідрофільною речовиною, і хоча поглинена волога може викликати розтріскування гранул, існують водостійкі модифікації. Він інертний, безпечний, стійкий до стирання та стиснення, термостійкий, вибухо- та пожежобезпечний, а також доступний за вартістю. Важливою перевагою є низькі енерговитрати на його регенерацію.

Силікагель є одним з перших синтетичних мінеральних сорбентів, що зберігає свою популярність. Він активно використовується для осушення повітря та газів, а також як вологопоглинач для запобігання корозії та збереження різних продуктів, текстилю, оптики, батарей та технічних деталей під час тривалого зберігання. В авіації силікагель застосовується в картриджах між вікнами для запобігання запотіванню, а в холодильній техніці — для зневоднення фреону. В медицині силікагелі також використовуються як ентеросорбенти.

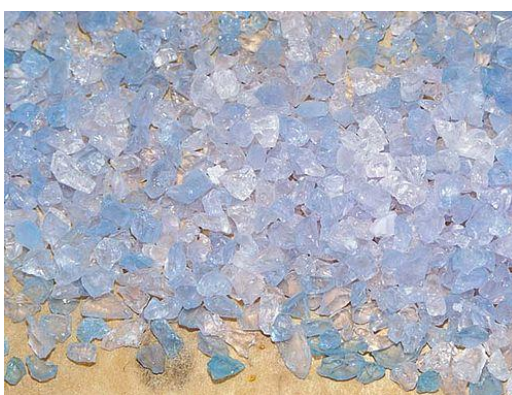


Рисунок 1.3 - Індикатор процесу сушіння — силікагель

Цеоліти

Цеоліти є гідратованими алюмосилікатами лужних елементів, що володіють унікальними властивостями. Вони характеризуються чудовою адсорбувальною здатністю завдяки великій загальній поверхні на одиницю об'єму та схильністю до поглинання значних кількостей води. Цеоліти також демонструють селективний іонний обмін. Їхня структура являє собою активні молекулярні сита з мережею порожнин та пор, що формують розвинений внутрішній простір. Порівняно з силікагелем, цеоліти мають вищу адсорбційну ємність, особливо при високих температурах.

Цеоліти є ефективними адсорбентами для осушувачів, особливо коли потрібна точка роси нижче $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вони також використовуються для очищення стічних вод від фосфору.

Алюмогелі (активованій оксид алюмінію)

Активованій оксид алюмінію представлений у вигляді гранул розміром 4-8 мм. Він здатен поглинати воду до 20% своєї маси та є відновлюваним абсорбентом, активність якого може бути відновлена нагріванням до 175 °С. Цей сорбент має високу адсорбційну здатність та вологопоглинання (280-380 м²/г), значну механічну та термічну стійкість (до 260 °С), а також стійкість до краплинної вологи. Активованій оксид алюмінію має довгий термін служби (до 16 000 годин в середніх промислових умовах). Хоча він дещо поступається цеоліту за вологоємністю, його перевагами є нижча температура регенерації та доступна вартість.

Алюмогелі широко використовуються для осушення газоподібних середовищ у різних промислових секторах. Вони є популярним наповнювачем для осушувачів стисненого повітря адсорбційного типу. Їх застосування є актуальним у холодній регенерації осушувачів, коли потрібна точка роси більша за -40 °С.

Полімерні сорбенти

Полімерні сорбенти характеризуються стійкістю до хімічних речовин, електро- та теплоізоляцією, високою міцністю при легкій вазі та легкістю обробки. Деякі волокнисті полімерні сорбенти, що містять природні добавки (наприклад, кору осики), можуть перевершувати чисте полістирольне волокно за нафто- та маслоємністю.

Полімери широко використовуються в медицині, електроніці, косметичі, промисловості та будівництві. Вони є перспективними для вилучення нафти та масел, а також можуть бути основою для ентеросорбентів.

Вибір сорбенту є компромісом між його сорбційною ємністю, селективністю, безпечністю (особливо в медицині), вартістю та легкістю регенерації. Наприклад, активоване вугілля високоефективне, але може сорбувати корисні речовини та травмувати ШКТ, тоді як силікагель інертний та безпечний, але може мати нижчу ємність за певних умов. Для медичних застосувань (ентеросорбція) акцент зміщується на біосумісність та

безпечність, що призводить до розробки капсульованих форм активованого вугілля або силікатних сорбентів. Для промислових процесів (осушення, очищення) критичними є ефективність, термін служби та економіка регенерації. Це пояснює, чому, наприклад, цеоліти можуть бути кращими для низьких точок роси, незважаючи на складнішу регенерацію, тоді як оксид алюмінію є більш універсальним та дешевшим. Це підкреслює, що розробка сорбентів є міждисциплінарною галуззю, що вимагає інтеграції знань з хімії матеріалів, інженерії процесів, токсикології та економіки. Майбутні інновації будуть зосереджені на створенні гібридних матеріалів, які поєднують найкращі властивості різних класів сорбентів, або на розробці нових методів модифікації поверхні для підвищення селективності та зменшення побічних ефектів.

Новітні та перспективні сорбційні матеріали

Останні десятиліття відзначилися значним прогресом у розробці нових класів пористих матеріалів, які демонструють винятковий потенціал у сорбційних технологіях. Серед них особливе місце посідають металоорганічні каркаси (MOFs) та ковалентні органічні каркаси (COFs).

Металоорганічні каркаси (MOFs)

MOFs є пористими, тривимірними кристалами, що характеризуються винятково великою внутрішньою поверхнею. Вони складаються з металоорганічних молекул, з'єднаних у великі сітчасті структури міцними хімічними зв'язками. MOFs мають регульовані розміри пор, постійну пористість та настроювані функціональні можливості, що робить їх надзвичайно привабливими для цільового дизайну.

Потенційні застосування MOFs охоплюють широкий спектр галузей:

- Уловлювання вуглецю (Carbon sequestration): Здатність MOFs поглинати та зберігати значні кількості цільових молекул робить їх придатними для уловлювання вуглекислого газу з промислових викидів. Такі компанії, як ExxonMobil та Mosaic Materials, активно досліджують цю технологію.

- Збирання води з пустельного повітря: Технологія збору води з повітря на основі MOF, розроблена лабораторією Омара Ягі, була визнана однією з десяти провідних технологій у хімії.
- Каталіз: MOFs можуть ефективно перетворювати хімічні речовини на нові субстанції. Дослідження показали, що гідратація є ключовою для покращення каталітичних властивостей MOF для промислового використання, впливаючи на їхню кислотність та каталітичний процес.
- Зберігання водню: MOFs встановили новий рекорд за ємністю зберігання водню за нормальних умов, пропонуючи більш ефективні системи для водневих транспортних засобів.
- Безпечне зберігання небезпечних газів: MOFs досліджуються для безпечнішого зберігання небезпечних газів.
- Енергетичні застосування: MOFs та їх похідні є перспективними каталізаторами для ключових електрохімічних реакцій, таких як реакція відновлення кисню (ORR), реакція виділення кисню (OER) та реакція виділення водню (HER). Вони також досліджуються як електродні матеріали для літій-іонних батарей (LIBs), де їхня пориста структура сприяє швидкій міграції іонів літію.

Однак, існують і значні виклики для широкого впровадження MOFs, включаючи обмежену електропровідність, структурну нестабільність при отриманні похідних та складність масштабованого та "зеленого" синтезу.

Ковалентні органічні каркаси (COFs)

COFs, подібні до MOFs, є пористими, тривимірними кристалами з винятково великою внутрішньою поверхнею. На відміну від MOFs, вони складаються виключно з органічних молекул, з'єднаних у великі сітчасті структури міцними ковалентними зв'язками. COFs характеризуються високою питомою поверхнею, регульованими розмірами пор, постійною пористістю, налаштованими функціональними можливостями, а також високою хімічною, термічною та механічною стабільністю.

Потенційні застосування COFs схожі на MOFs і включають:

- Уловлювання вуглецю: COFs також придатні для захоплення вуглецю.
- Штучний фотосинтез: Вивчаються для імітації процесу виробництва палива рослинами.
- Енергетичні застосування: COFs є перспективними каталізаторами для ORR, OER, HER, а також використовуються як електроліти та електродні матеріали для LIBs.
- Управління забрудненням навколишнього середовища: COFs ефективно видаляють іони важких металів та органічні забруднювачі з води завдяки координаційній адсорбції, іонному обміну, водневим зв'язкам, π - π стекингу та селективному виключенню за розміром пор.

Основними викликами для COFs є обмежена електропровідність, складність масштабованого синтезу та потреба в кращому розумінні механізмів та *in situ* характеристиках.

Застосування MOFs та COFs в енергетиці та екології є особливо помітним. У реакції відновлення кисню (ORR), MOF- та COF-похідні вуглецеві матеріали та одноелементні каталізатори (SACs) демонструють перспективну активність. Для реакції виділення кисню (OER) ефективними підходами є перетворення MOFs на ультратонкі шари, використання багатовимірних MOFs (MTV-MOFs) та гетероструктур. У реакції виділення водню (HER) MOFs та COFs покращують генерацію H₂ шляхом оптимізації транспорту електронів та активних центрів. У літій-іонних батареях (LIBs) пориста структура MOFs та COFs покращує міграцію іонів Li(I); вони використовуються як анодні матеріали та електроліти. Для видалення важких металів MOFs та COFs адсорбують іони через координаційну адсорбцію, іонний обмін та електростатичні взаємодії. Органічні забруднювачі, такі як фармацевтичні препарати, ефективно видаляються MOFs та COFs через фізичну адсорбцію, водневі зв'язки, π - π стекинг та каталітичну деградацію.

Револьюційний потенціал MOFs та COFs є очевидним, але існують значні бар'єри до їх широкого впровадження. Хоча ці матеріали демонструють

виняткові показники в лабораторних умовах, їхня складність синтезу, висока вартість, а також питання стабільності та регенерації в реальних промислових умовах є основними перешкодами. Існує розрив між теоретичним потенціалом та практичною реалізацією. Наприклад, для застосування в батареях чи каталізі, низька електропровідність MOFs/COFs є критичним недоліком, який вимагає подальших досліджень та модифікацій. Майбутні дослідження в цій галузі будуть зосереджені не тільки на відкритті нових структур MOFs/COFs, але й на розробці інженерних рішень для подолання цих практичних викликів. Це включає розробку економічно ефективних та екологічно чистих методів масштабованого виробництва, покращення їхньої провідності та стабільності, а також інтеграцію з іншими матеріалами для створення гібридних систем. Успішне подолання цих бар'єрів може справді революціонізувати багато галузей, де сорбція відіграє ключову роль.

1.4. Принципи вибору сорбентів для контролю забруднення довкілля

Вибір сорбенту для ефективного контролю забруднення довкілля є складним процесом, що вимагає ретельного врахування численних технічних, економічних та екологічних факторів. Оптимальний вибір сорбуючого матеріалу або їх комбінації дозволяє досягти високого ступеня очищення значних обсягів води від різноманітних забруднювачів. Сорбенти — це речовини, які поглинають гази, пари або розчинені речовини з навколишнього середовища, і цей процес поглинання називається сорбцією.[7]

Ключовим аспектом при виборі сорбенту є його сорбувальна здатність та ємність матеріалу. Сорбент повинен демонструвати максимально можливу поглинальну здатність, що безпосередньо залежить від його розвиненої поверхні та пористості.[13] Це означає, що матеріал повинен мати велику кількість мікро-, мезо- та макропор, які можуть ефективно захоплювати молекули забруднювачів. Наприклад, активоване вугілля відоме своєю високою пористістю та великою площею поверхні, що робить його ефективним адсорбентом.

Не менш важливою є селективність сорбенту, тобто його здатність вибірково вилучати цільовий компонент, мінімізуючи поглинання інших речовин. Це особливо актуально для іонообмінних смол, які функціонують на принципі селективного іонного обміну, вибірково обмінюючи іони з розчину на власні іони. Висока селективність забезпечує ефективність процесу очищення та запобігає зайвому насиченню сорбенту небажаними компонентами, що є критично важливим для економічної ефективності та мінімізації відходів.

Механічна міцність та стійкість сорбенту є критичними для його довговічності та можливості багаторазової регенерації. Матеріал повинен бути стійким до стирання та стиснення, що дозволяє йому витримувати численні цикли використання без втрати своїх властивостей. Крім того, важлива хімічна інертність сорбенту до поглинених речовин, що запобігає його руйнуванню або утворенню небажаних побічних продуктів. Термостійкість також є ключовим фактором, особливо для сорбентів, що підлягають термічній регенерації, оскільки вона забезпечує стабільність матеріалу при високих температурах.

Можливість регенерації та десорбції є фундаментальною вимогою до сучасних сорбентів з точки зору циркулярної економіки. Сорбент повинен легко вивільняти поглинені речовини та відновлювати свою поглинальну здатність для повторного використання. Це не тільки знижує операційні витрати, але й зменшує обсяги відходів, сприяючи сталому розвитку.

Економічна ефективність та доступність матеріалу також відіграють значну роль. Природні сорбенти, такі як глинисті мінерали (наприклад, каолін, бентоніт), часто є дешевшими та доступнішими завдяки наявності великих промислових родовищ в Україні.[14] Використання місцевої сировини може суттєво знизити витрати на очисні заходи, роблячи технології більш привабливими для широкого впровадження.

Нарешті, безпека та екологічність сорбенту є невід'ємними критеріями. Матеріал повинен бути інертним, вибухо- та пожежобезпечним, а також не

створювати вторинного забруднення після використання або утилізації. Вибір сорбенту також залежить від природи забруднювача, його полярності, розміру та структури молекул, а також від умов застосування, таких як температура та тиск. Врахування всіх цих принципів дозволяє оптимізувати процес очищення, забезпечити екологічну безпеку та мінімізувати капітальні та експлуатаційні витрати.

Таблиця 1.2 - Критерії вибору сорбентів для контролю забруднення довкілля

Критерій	Опис
Сорбувальна здатність та ємність	Максимальна поглинальна здатність, залежить від розвиненої поверхні та пористості.
Селективність	Здатність вибірково вилучати цільовий компонент, мінімізуючи поглинання інших речовин.
Механічна міцність та стійкість	Висока стійкість до стирання, стиснення, хімічна інертність до поглинених речовин, термостійкість.
Можливість регенерації та десорбції	Здатність легко вивільняти поглинені речовини та відновлювати поглинальну здатність для повторного використання.
Економічна ефективність та доступність	Низька вартість, наявність місцевої сировини, що знижує витрати.
Безпека та екологічність	Інертність, вибухо- та пожежобезпечність, відсутність вторинного забруднення після використання або утилізації.

Природа забруднювача та умови застосування	Вплив полярності, розміру та структури молекул забруднювача, а також температури та тиску середовища.
--	---

1.5 Висновки

Постійний розвиток сорбційних технологій зумовлений зростаючими потребами в очищенні навколишнього середовища, енергозбереженні та медичних застосуваннях. Особливу увагу приділяється розробці новітніх матеріалів, таких як металоорганічні (MOFs) та ковалентні органічні каркаси (COFs), які пропонують безпрецедентні можливості для цілеспрямованого дизайну сорбентів з високою селективністю та ефективністю. Ці матеріали, завдяки своїй унікальній пористій структурі та настроюваним функціональним групам, демонструють величезний потенціал у таких сферах, як уловлювання вуглецю, зберігання водню, каталіз та видалення забруднювачів.

Майбутні дослідження будуть зосереджені на подоланні існуючих викликів, таких як масштабований та економічно ефективний синтез цих матеріалів, покращення їхньої стабільності та провідності, а також на глибшому розумінні механізмів взаємодії на молекулярному рівні для подальшої оптимізації їхніх властивостей. Інтеграція сорбції з іншими процесами (наприклад, каталізом, мембранними технологіями) та використання передових обчислювальних методів (включаючи машинне навчання) відкривають нові горизонти для створення "розумних" сорбційних систем, що здатні адаптуватися до змінних умов та забезпечувати високу продуктивність у реальних застосуваннях. Це підкреслює міждисциплінарний характер галузі та її значний вплив на технологічний прогрес.

2 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ СОРБЕНТІВ У КОНТРОЛІ КОНКРЕТНИХ ВИДІВ ЗАБРУДНЕНЬ

2.1. Очищення води

Сорбенти відіграють ключову роль у забезпеченні якісної води для різноманітних потреб, будучи одним з найпопулярніших та найпоширеніших методів водоочищення. Їхнє застосування охоплює широкий спектр забруднювачів, від органічних сполук до важких металів та радіонуклідів.

У процесі очищення води сорбційні фільтри ефективно поглинають домішки з рідин, покращуючи органолептичні властивості води та видаляючи розчинені органічні речовини та гази. Принцип роботи таких фільтрів базується на тому, що забруднена вода проходить через шар сорбенту, який завдяки своїй пористій структурі та великій площі поверхні захоплює молекули забруднювачів. Активоване вугілля, наприклад, є потужним інструментом для зниження вмісту хлору та загального органічного вуглецю, а також для усунення природних гумінових кислот та широкого спектру промислових органічних забруднювачів, таких як фенол та хлорорганічні сполуки. Його ефективність пояснюється розвиненою системою мікро-, мезо- та макропор, які забезпечують високу адсорбційну здатність.

Механізм адсорбції активованого вугілля полягає у фізичному притяганні молекул забруднювачів до його поверхні за рахунок ван-дер-ваальсових сил. Цей процес є оборотним, що дозволяє частково відновлювати активоване вугілля шляхом зворотного промивання водою. Однак, якщо відбувається хімічна реакція між сорбентом та забруднювачем (хемосорбція), процес стає переважно незворотним, і речовини міцно фіксуються на поверхні сорбенту.

У боротьбі з нафтопродуктами сорбенти демонструють високу ефективність для ліквідації забруднень як на водних поверхнях, так і в ґрунті. Особливо перспективними є вуглецеві сорбенти, виготовлені з тирси різних порід дерев, які мають значну нафтопоглинальну здатність. Ці матеріали часто модифікуються для підвищення їхньої гідрофобності, що дозволяє їм ефективно поглинати нафту, відштовхуючи воду. Крім того, торфові сорбенти, гідрофобізований перліт, а також матеріали на основі лушпиння гречки та рису демонструють високу ефективність. Дослідження показали, що пінополістирол є одним з найбільш ефективних сорбентів для очищення води від відпрацьованих моторних олив, повністю поглинаючи масляну плівку з поверхні.[15]

Видалення важких металів та радіонуклідів є одним з найактуальніших завдань у сфері водоочищення. Розробляються нові сорбційні матеріали, такі як композитні біосорбенти на основі біовугілля та заліза, оксиди титану та марганцю, гранульовані неорганічні матеріали на основі силікатів цирконію та магнію, а також механохімічно активований монтморилоніт та нанодисперсні порошки заліза. Ці матеріали демонструють високу сорбційну ємність та селективність до іонів міді, кадмію, цезію, свинцю, миш'яку, урану, стронцію, цинку, кобальту та хрому. Принцип їхньої дії часто базується на іонному обміні або хемосорбції, де іони забруднювачів утворюють міцні зв'язки з поверхнею сорбенту. Природні сорбенти, зокрема кліноптилоліт та бентоніт, також активно використовуються для видалення амонію, радіоактивного забруднення та важких металів завдяки своїй пористій структурі та іонообмінним властивостям.[14]

У сфері очищення промислових стічних вод сорбційні системи знаходять застосування для глибокого очищення від фенолів, роданідів, аміаку, фосфатів та інших забруднювачів. Наприклад, у коксохімічному виробництві ефективно використовуються природні адсорбенти на основі лушпиння соняшника для зниження вмісту фенолу. Для очищення міських фосфоровмісних стічних вод застосовується торф як природний адсорбент, а насичений фосфатами

торф'яний шлам може бути перетворений на нові типи органічних та біомінеральних добрив.

Ефективність очищення води сорбентами залежить від багатьох факторів, включаючи тип сорбенту, його концентрацію, час контакту, рівень рН розчину та мінералізацію води. Дослідження показують, що сумісне застосування алюмінієвих коагулянтів з сорбентами, такими як бентоніт або активоване вугілля, може забезпечити видалення до 97-99% нафти з емульсій.

2.2. Очищення ґрунту та запобігання забрудненню ґрунтових вод

Сорбційні методи відіграють значну роль у детоксикації ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтою та нафтопродуктами. Ці забруднювачі становлять серйозну загрозу, оскільки вони не тільки накопичуються в ґрунті та можуть біоакумулюватися в живих організмах, але й мігрують у ґрунтові води, погіршуючи їхню якість.

Детоксикація важких металів у ґрунті є критично важливою проблемою. Важкі метали, такі як кадмій, мідь, свинець та миш'як, є токсичними навіть у низьких концентраціях і не розкладаються, а лише трансформуються, стаючи частиною солей, оксидів та органометалічних сполук. Їх підвищені концентрації порушують агроценози, роблячи землі непридатними для сільськогосподарських культур. Сорбційні рішення передбачають зв'язування рухомих форм важких металів у важкорозчинні сполуки (сульфіди, карбонати, фосфати, гідроксиди) на поверхні сорбентів, внесених у ґрунт, що допомагає знизити їхню токсичність. Принцип роботи полягає у тому, що сорбенти, завдяки своїй хімічній природі та поверхневим властивостям, утворюють міцні, важкорозчинні сполуки з іонами металів, тим самим іммобілізуючи їх у ґрунті та запобігаючи їхньому вимиванню у ґрунтові води. Дослідження показують, що екосорбенти на основі сірковмісного біовугілля з рисового лушпиння можуть ефективно зв'язувати іони Cd(II) та Cu(II), запобігаючи їхньому переходу в рослини та, відповідно, у водні системи. Ступінь вилучення Cd(II) досягає 98%, а Cu(II) — 93%. Ефективність сорбції залежить

від рН розчину: для Cd(II) оптимальний рН 6-8, для Cu(II) — 4-6. Крім того, розробляються сорбенти на основі каоліну та рідкого скла, які ефективно вилучають іони цезію, кадмію та свинцю.

Очищення ґрунту від нафтопродуктів є ще одним важливим напрямком застосування сорбентів. Нафтове забруднення є складним і стійким, особливо для піщаних ґрунтів з бідним біоценозом. Сорбційний метод є перспективним у відновленні нафтозабруднених територій. Активоване вугілля та терморозширений графіт ефективно зменшують фітотоксичний ефект нафтозабруднених ґрунтів, причому для терморозширеного графіту фітотоксичний ефект не перевищував 20%. Розробка біосорбційних комплексів, що поєднують сорбційний матеріал (наприклад, глауконіт-сmekтоніт) з іммобілізованими нафтоокислюючими мікроорганізмами, дозволяє локалізувати та деструктурувати нафтопродукти. Принцип їхньої роботи полягає у тому, що сорбент спочатку фізично поглинає нафту, а потім іммобілізовані мікроорганізми біологічно розкладають вуглеводні, перетворюючи їх на нешкідливі сполуки. Ці комплекси здатні знижувати концентрацію нафтового забруднення в ґрунті з 30-40% до 1-5% за 140 днів. Торфові сорбенти також демонструють високу ефективність у ліквідації нафтових забруднень ґрунту.[16]

Довгострокові наслідки забруднення ґрунту важкими металами та нафтопродуктами включають не лише прямий вплив на рослинність та мікроорганізми, але й ризик міграції цих забруднювачів у підземні води, що є джерелом питної води. Сорбенти, інтегровані в ґрунт, діють як бар'єри, що зв'язують токсичні елементи та запобігають їхньому подальшому поширенню. Це особливо важливо для сільськогосподарських угідь, де забруднення може потрапляти в харчовий ланцюг.

Застосування біосорбційних комплексів є інноваційним підходом, який поєднує фізичну сорбцію з біологічною деградацією. Це дозволяє не тільки швидко локалізувати забруднення, але й забезпечити його повне або майже повне знешкодження на місці. Такий комплексний підхід є більш екологічно

безпечним та економічно вигідним у довгостроковій перспективі, оскільки зменшує потребу у вивезенні та утилізації забрудненого ґрунту.

2.3. Успішні приклади застосування сорбентів для очищення води в промисловості та екології

Сорбенти знайшли широке застосування в різних галузях промисловості та екології, демонструючи свою ефективність у вирішенні складних завдань щодо контролю забруднення водних ресурсів.

У промисловому очищенні стічних вод сорбційні системи є невід'ємною частиною очисних споруд та заводів з переробки відходів. Наприклад, у коксохімічному виробництві природні адсорбенти на основі лушпиння соняшника та глауконіту застосовуються для очищення фенольних стічних вод, що значно покращує їх якість перед біологічною обробкою. Для очищення міських фосфоровмісних стічних вод використовується торф як природний адсорбент, а насичений фосфатами торф'яний шлам може бути перетворений на цінні органічні та біомінеральні добрива. Урановидобувна промисловість також впроваджує нові фільтраційні та сорбційні системи для очищення стічних вод, що є частиною розвитку "чистіших" технологій. Дослідження показали, що кислотно-активованій цеоліт може ефективно знижувати вміст хлоридів у міських та промислових відходах до допустимих норм.

Нафтопродукти, утворюючи плівку на поверхні води, перешкоджають газообміну між водою та атмосферою, що критично знижує вміст кисню. Шматки мазуту осідають на дно, знищуючи бентосні мікроорганізми, які відіграють ключову роль у самоочищенні води. Крім того, відкладення сполук важких металів у донних відкладеннях стають джерелом вторинного забруднення, оскільки при вичерпанні адсорбційної здатності осадів важкі метали знову надходять у воду, спричиняючи екологічну кризу.

Ліквідація нафтових розливів на водних об'єктах є однією з найважливіших сфер застосування сорбентів. Сорбційний метод вважається одним з найефективніших та екологічно доцільних для видалення нафтових

плівок. Використовуються як природні матеріали, такі як бавовна, торф, тирса, глина, так і штучні синтетичні матеріали, включаючи пінополіуретан та синтетичні волокна. В Україні широко застосовуються природні органічні сорбенти, наприклад, Екоморф (на основі торфу), для ліквідації розливів нафти та нафтопродуктів завдяки їхній екологічній безпечності та високій нафтоємності.[18] Пінополістирол виявився надзвичайно ефективним для очищення води від відпрацьованих моторних олив, повністю поглинаючи масляну плівку з поверхні.

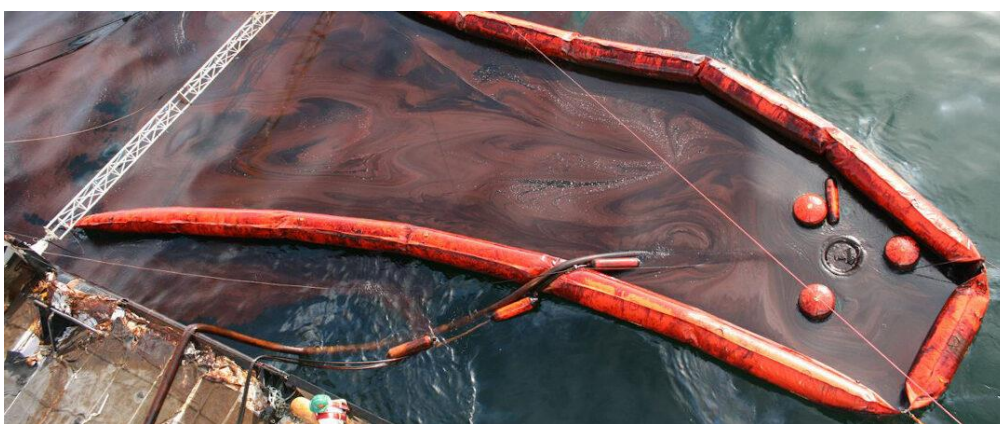


Рисунок 2.1 - Ліквідація розливу нафти за допомогою сорбентів та біопрепаратів

У сфері вилучення іонів металів та радіонуклідів з водних розчинів постійно розробляються нові сорбційні матеріали. Ці матеріали призначені для селективного вилучення іонів цезію, кадмію, свинцю, міді, урану, літію, миш'яку, стронцію, цинку, кобальту та хрому зі стічних та природних вод. Серед успішних прикладів можна виділити композитні біосорбенти на основі біовугілля, природних алюмосилікатів та сполук заліза для очищення води від урану (VI). Також розроблені адсорбенти на основі оксидів титану для концентрування літію, літій-марганцеві оксиди зі шпінельною структурою як високоселективні сорбенти для літію, та гранульовані неорганічні матеріали на основі силікатів цирконію та магнію для очищення високомінералізованих вод від миш'яку. Сорбційні матеріали на основі каоліну та рідкого скла ефективно вилучають іони цезію, кадмію, свинцю та міді. Механохімічно

активований монтморилоніт демонструє високу ефективність для видалення радіонуклідів, а нанодисперсні порошки заліза на глинистих мінералах ефективні для видалення важких металів з багатокомпонентних стічних вод.

Сорбційні методи також важливі для очищення ґрунту від забруднень, що впливають на водні ресурси. Вони відіграють значну роль у детоксикації ґрунтів, забруднених важкими металами та нафтопродуктами, що може впливати на якість ґрунтових вод. Екосорбенти на основі сірковмісного біовугілля з рисового лушпиння ефективно зв'язують іони Cd(II) та Cu(II), запобігаючи їхньому переходу в рослини та, відповідно, у водні системи. Крім того, розроблено та випробувано гранульований біосорбційний композит "Грандетокс" для очищення ґрунту від накопичених пестицидів, що дозволило знизити агрохімічне забруднення ґрунту на 70% за 3 місяці.

2.4. Порівняльна характеристика сорбентів для видалення нафтових плівок

Для кращого розуміння ефективності та доцільності використання різних типів сорбентів для видалення нафтових плівок, їхні характеристики можна порівняти у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Порівняльна характеристика сорбентів для видалення нафтових плівок

Тип сорбенту	Переваги	Недоліки
Неорганічні сорбенти (глина, діатоміт, цеоліти, туфи, пемза)	Низька вартість, можливість виробництва у великих обсягах, термостійкість (дозволяє	Низька ємність (не утримують бензин, дизельне паливо, гас), тонуть разом з нафтою у водному середовищі, низька щільність (потребує

	використовувати при загрозі загоряння).	великих обсягів для доставки).
Синтетичні сорбенти (гідратцелюлоза, пінополіуретан, поліпропіленові волокна)	Висока нафтоємність, простота схеми регенерації (віджимання поглиненої нафти для повторного використання).	Токсичність (обмежує використання у вигляді дрібних порошків), низька щільність (потребує великих обсягів для доставки).
Органомінеральні та природні органічні сорбенти (тирса, модифікований торф, висушені зернопродукти, вовна, макулатура, відходи льоно- та бавовняного виробництва)	Екологічна чистота та безпечність, широка сировинна база, висока нафтоємність при невисокій вартості, здатність до біорозкладання.	Залежність від температурних умов (малоефективні за низьких температур), деякі можуть поглинати воду разом з нафтою (наприклад, тирса без попередньої обробки).

2.5 Висновки

Практичне застосування сорбентів у різних середовищах довкілля показало їхню універсальність та високу ефективність у ліквідації забруднень. Так, сорбційні технології [12, 13, 14, 15, 16, 17, 3] дозволяють суттєво знижувати концентрації важких металів та органічних токсинів до гранично безпечних рівнів (порядку мкг/дм³). Одночасно застосування сорбентів у повітряних і

грунтових системах довело свою ефективність у практиці (зокрема у зниженні емісій NH_3 , H_2S , VOC та стабілізації токсинів у ґрунті) . Регенерація та повторне використання насичених сорбентів дозволяють економити ресурси, а дотримання нормативно-правових вимог гарантує мінімізацію екологічних ризиків, пов'язаних з їх відпрацьованим станом . Таким чином, сорбційні методи є одним із найбільш перспективних інструментів контролю забруднень, за умови правильної експлуатації і управління вторинними відходами.

3. МЕТОДИ ДЕСОРБЦІЇ ТА РЕГЕНЕРАЦІЇ СОРБЕНТІВ

3.1. Класифікація методів десорбції та регенерації

Десорбція є процесом, зворотним сорбції, під час якого поглинена речовина (сорбат) вивільняється з сорбенту. Натомість, регенерація — це ширше поняття, що охоплює десорбцію та інші процедури, спрямовані на відновлення поглинальної здатності сорбенту для його подальшого повторного використання. Можливість регенерації є однією з ключових вимог до сучасних сорбентів, особливо в промисловості, де вона забезпечує економічну та екологічну доцільність.

Методи десорбції та регенерації сорбентів можна класифікувати за основним принципом їхньої дії. Фізичні методи базуються на зміні фізичних умов, таких як температура, тиск або концентрація, для вивільнення сорбату без хімічної модифікації самого сорбенту. Ці методи часто є менш енергоємними та дозволяють зберегти структуру сорбенту. Хімічні методи передбачають використання хімічних реагентів, які взаємодіють з сорбатом або поверхнею сорбенту. Ця взаємодія призводить до вивільнення поглиненої речовини або відновлення активних центрів сорбенту. Хімічна регенерація є особливо важливою для хемосорбентів, де утворюються міцні хімічні зв'язки. Термічні методи використовують нагрівання для випаровування або термічного розкладання сорбованих речовин. Ці методи ефективні для видалення летких органічних сполук та можуть бути використані для активації сорбенту.

Крім цих основних категорій, існують також специфічні підходи. Компресійні методи застосовуються для вилучення поглиненої рідини шляхом віджимання на фільтр-пресах або центрифугах. Новим рішенням у цій галузі є безреагентна фізико-хімічна обробка природних матеріалів, що дозволяє отримувати нафтові сорбенти без використання додаткових реагентів. Для іонообмінних смол, які є особливою та ефективною групою сорбентів, регенерація зазвичай відбувається хімічним шляхом, за допомогою реагентів,

що містять витісняючий іон. Наприклад, катіоніти регенеруються соляною, азотною або сірчаною кислотами, а аніоніти — розчином гідроксиду натрію.

Вибір конкретного методу регенерації залежить від типу сорбенту, природи поглиненої речовини, а також від економічних та екологічних міркувань. Наприклад, для фізично адсорбованих речовин часто достатньо фізичних методів, тоді як для хемосорбованих потрібні більш інтенсивні хімічні або термічні впливи. Ефективність регенерації визначається ступенем відновлення сорбційної ємності та кількістю циклів, які сорбент може витримати без значної втрати властивостей.

3.2. Фізичні методи регенерації та їх принципи застосування

Фізичні методи регенерації є важливим підходом для відновлення сорбційної здатності матеріалів, що базується на зміні фізичних умов для десорбції поглинених речовин. Ці методи відіграють значну роль у підтримці ефективності сорбентів протягом тривалого часу.

Одним з найпоширеніших фізичних методів є продування ненагрітим або нагрітим стисненим повітрям, особливо для осушувачів повітря. Різні види адсорбентів можуть бути регенеровані шляхом продування холодним або гарячим повітрям, що дозволяє виділяти адсорбенти холодної та гарячої регенерації. Принцип цього методу полягає у випаровуванні вологи або інших поглинених речовин за рахунок потоку газу, що проходить через сорбент. Це дозволяє видалити леткі забруднювачі, не пошкоджуючи структуру сорбенту.

Нагрівання є ефективним способом десорбції, особливо для фізичної адсорбції, оскільки її ефективність зменшується зі зростанням температури.[24] Наприклад, для відновлення активності оксиду алюмінію, який широко використовується в осушувачах, його нагрівають до 175 °C протягом 7-8 годин. Цей процес дозволяє вивільнити поглинену вологу та відновити пористу структуру сорбенту, забезпечуючи його готовність до подальшого використання.

Для активованого вугілля, що застосовується для очищення води, можливе часткове відновлення шляхом зворотного промивання водою.[19] Цей метод дозволяє вивільнити частину сорбованої речовини, оскільки фізична адсорбція є оборотною. Промивання зворотним струмом води допомагає видалити забруднювачі, що утримуються на поверхні сорбенту за рахунок слабких ван-дер-ваальсових сил, а також механічно вимиває затримані частинки.

Компресійні методи, такі як віджимання на фільтр-пресах або центрифугах, можуть застосовуватися для вилучення поглинених рідин, зокрема нафтопродуктів, з сорбентів. Однак важливо враховувати, що ці методи можуть порушувати структуру сорбенту та його ємність, що призводить до необхідності частішої регенерації. Їх застосування можливе лише з урахуванням термостійкості сорбційного матеріалу.

Фізичні методи регенерації часто є менш енергоємними порівняно з хімічними або термічними методами, що вимагають високих температур, що робить їх економічно привабливими та сприяє зниженню експлуатаційних витрат. Проте, вони можуть бути недостатньо ефективними для видалення сильно зв'язаних або хімічно модифікованих забруднювачів, що обмежує їхнє застосування у деяких випадках.



Рисунок 3.1 – Установка регенерації сорбентів СММ-4РП

3.3. Хімічні та термічні методи регенерації, принципи застосування

Хімічні та термічні методи регенерації є ключовими для відновлення сорбентів, особливо у випадках, коли фізичні методи виявляються недостатньо ефективними або коли сорбція відбувається за механізмом хемосорбції, що передбачає утворення міцних хімічних зв'язків.

Хімічні методи регенерації передбачають обробку насиченого сорбенту хімічними реагентами, які взаємодіють з поглиненими речовинами, витісняючи їх або перетворюючи на форми, що легко видаляються. Реагенти можуть бути використані для конкурентного витіснення сорбату з активних центрів сорбенту. Наприклад, для іонообмінних смол, які широко використовуються для очищення води, регенерація катіонітів відбувається за допомогою кислот, таких як соляна, сірчана або азотна. Аніоніти, у свою чергу, регенеруються розчином гідроксиду натрію. Цей процес може бути прискорений шляхом нагрівання регенеруючого розчину, що підвищує швидкість хімічних реакцій.

Деякі хімічні обробки спрямовані на очищення пор та збільшення кількості адсорбційних центрів сорбенту. Це може включати обробку розчинами гідроксиду натрію, формальдегіду або різних кислот.[20] Така обробка може призвести до окислення полімерів, видалення гідрофобних речовин, збільшення пористості та гідрофільності сорбенту, що посилює хемосорбцію та здатність зв'язувати іони важких металів. Крім того, реагенти можуть розчиняти або хімічно руйнувати поглинену речовину. Наприклад, через шар насиченого адсорбенту пропускають розчинник, інертний газ або водяну пару, що дозволяє вивести забруднювач з сорбенту.

Термічні методи регенерації використовують високі температури для десорбції або термічного розкладання поглинених речовин. Нагрівання сорбентів без доступу повітря до 250-300 °C дозволяє відганяти леткі фракції поглинених речовин. Цей метод ефективний для видалення органічних сполук з низькою температурою кипіння. Для активованого вугілля активація та

регенерація можуть включати обробку гарячою парою та/або вуглекислим газом при 800-850 °С, або обробку гарячою парою з обмеженою кількістю повітря для згоряння певної кількості вугілля. Силікагель або оксид алюмінію можуть вимагати попередньої витримки при дуже високих температурах, наприклад, 3000 °С у глибокому вакуумі або при продуванні інертного газу. Піроліз, як термічний метод, передбачає нагрівання матеріалу без доступу кисню. Хоча піроліз не завжди безпосередньо згадується як метод регенерації сорбентів, він може бути застосований для утилізації насичених органічними забруднювачами сорбентів, перетворюючи їх на цінні продукти, такі як пірокарбон, який потім може бути використаний для отримання паливних брикетів. Важливою умовою при використанні термічних методів є врахування термостійкості сорбційного матеріалу, щоб запобігти його руйнуванню. Комплексна термічна та кислотна модифікація може значно покращити адсорбційні та хемосорбційні властивості сорбенту. Термодинаміка відіграє ключову роль у визначенні спонтанності та рівноваги сорбційних процесів. Основними термодинамічними параметрами, що характеризують сорбцію, є зміна енергії Гіббса (ΔG), ентальпії (ΔH) та ентропії (ΔS).

Енергія Гіббса (ΔG) є визначальним критерієм спонтанності процесу. Від'ємне значення ΔG вказує на те, що процес є спонтанним і може відбуватися без зовнішнього енергетичного втручання. Ентальпія (ΔH) відображає тепловий ефект процесу. Екзотермічні процеси ($\Delta H < 0$) виділяють тепло, тоді як ендотермічні ($\Delta H > 0$) — поглинають. Більшість сорбційних процесів, особливо фізична адсорбція, є екзотермічними. Ентропія (ΔS) відображає зміну неупорядкованості системи. Збільшення ентропії ($\Delta S > 0$) сприяє спонтанності процесу.[21]

Термодинамічний аналіз дозволяє глибоко зрозуміти природу сорбційних взаємодій. Наприклад, для фізичної адсорбції хлориду амонію на природному цеоліті термодинамічні розрахунки підтверджують, що це екзотермічний та спонтанний фізичний процес, що характеризується від'ємними значеннями ΔG та ΔH . Для хемосорбції, взаємодія є значно

сильнішою. Дослідження показали, що хемосорбція фосфату та утворення поліфосфату в порах сорбенту є спонтанною реакцією. Це підтверджується значними від'ємними значеннями ізобарно-ізотермічного потенціалу: $\Delta G = -1202.91$ кДж/моль при температурі 298 К. Ентальпія цього процесу також значно від'ємна ($\Delta H = -1084.6$ кДж/моль), що вказує на сильне виділення тепла. Зміна ентропії для цієї реакції є позитивною ($\Delta S = 0.397$ кДж/(моль·К)), що також сприяє її спонтанності.[21] Для ортофосфорної кислоти термодинамічні розрахунки підтвердили, що її поглинання відбувається за механізмом полімолекулярної адсорбції, що узгоджується з результатами розрахунків за методом БЕТ та термогравіметричного аналізу. Спонтанність сорбційних процесів, підтверджена від'ємними значеннями ΔG , є фундаментальною передумовою для їх широкого практичного використання. Це означає, що сорбція може відбуватися без постійного зовнішнього енергетичного вкладу, що є надзвичайно вигідним для таких застосувань, як очищення стічних вод. Розуміння термодинамічних параметрів дозволяє не тільки підтвердити спонтанність, але й прогнозувати умови, за яких сорбція буде найбільш ефективною. Наприклад, значні від'ємні значення ΔH для хемосорбції фосфатів вказують на те, що процес є сильно екзотермічним. Це може мати наслідки для контролю температури в реакторі для оптимізації виходу та запобігання десорбції, підкреслюючи важливість термодинамічного моделювання при розробці нових сорбційних матеріалів та процесів. Термодинамічні параметри є не просто теоретичними описами; вони є прогностичними інструментами для оптимізації продуктивності сорбенту та стратегій регенерації. Наприклад, високоекзотермічна хемосорбція може вимагати ретельного контролю температури під час регенерації, щоб запобігти втраті енергії або деградації сорбенту, що пов'язує фундаментальну хімію з практичними інженерними проблемами.

Вплив температури на сорбційну рівновагу є також значним. Температура є одним з ключових факторів, що впливають на швидкість та рівновагу сорбційних процесів. Збільшення температури, як правило, зменшує

адсорбцію, оскільки більшість сорбційних процесів є екзотермічними, і згідно з принципом Ле Шательє, підвищення температури зміщує рівновагу в бік десорбції. Однак, для деяких процесів, особливо хемосорбції, де утворюються стабільні хімічні зв'язки, підвищення температури може сприяти прискоренню кінетики.

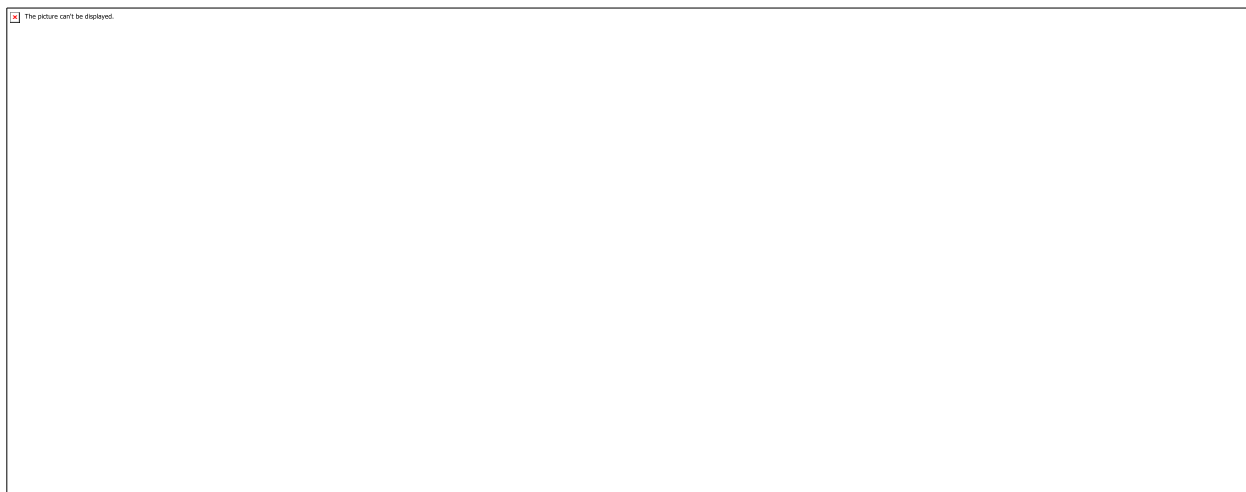


Рисунок 3.2 - Механізм адсорбції (фізична та хімічна)

3.4. Економічна та екологічна доцільність регенерації та утилізації

Економічна та екологічна доцільність регенерації сорбентів є фундаментальним аспектом сталого управління забрудненням та ресурсами. Цей підхід дозволяє не тільки оптимізувати витрати, але й мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Економічні переваги регенерації є значними. Можливість багаторазового використання одного й того ж сорбенту суттєво знижує операційні витрати порівняно з постійною закупівлею нового матеріалу. Це особливо актуально для дорогих сорбентів, таких як активоване вугілля. Крім того, регенерація дозволяє зменшити витрати на утилізацію. Відсутність регенерації призводить до утворення великих обсягів відпрацьованих, часто високотоксичних сорбентів, які потребують спеціального зберігання, захоронення або переробки, що є значними фінансовими витратами. Регенерація ж значно

скорочує обсяги відходів, тим самим зменшуючи ці витрати. У деяких випадках, десорбція дозволяє не тільки відновити сорбент, але й вилучити поглинені речовини, які можуть мати економічну цінність і бути повторно використані в технологічному циклі. Синтетичні сорбенти, наприклад, часто мають просту схему регенерації, що дозволяє віджимати поглинену нафту для її повторного використання.

Цей підхід є ключовим фактором у зменшенні кількості відходів, що утворюються в процесі очищення, мінімізуючи навантаження на полігони та знижуючи ризик вторинного забруднення довкілля. Правильна регенерація або утилізація запобігає вивільненню поглинених забруднювачів назад у довкілля. Наприклад, відпрацьовані сорбенти для нафтопродуктів, якщо їх не утилізувати належним чином, можуть призвести до вторинного забруднення водних об'єктів. Можливість повторного використання сорбентів та утилізації відпрацьованих матеріалів відповідає принципам циркулярної економіки, що передбачає максимальне використання ресурсів та мінімізацію відходів. Це демонструє фундаментальний зсув парадигми від традиційної лінійної моделі "використання-утилізація" до більш сталої, циркулярної моделі "використання-перепрофілювання", максимізуючи цінність матеріалів протягом їх життєвого циклу.

Навіть якщо регенерація неможлива або економічно недоцільна, наприклад, для більшості природних сорбентів, відпрацьовані матеріали можуть бути утилізовані з користю, що зменшує екологічне навантаження. Відпрацьовані сорбенти, особливо ті, що містять органічні компоненти або поглинені органічні речовини, можуть бути використані як біопаливо. Вони також можуть бути застосовані як добавки для дорожнього покриття, замінюючи ґрунтову добавку, або у виробництві пористого керамічного будівельного матеріалу. Крім того, відпрацьовані сорбенти можуть слугувати як підстилковий матеріал для створення антифільтраційних екранів на полігонах побутових та промислових відходів, забезпечуючи значний опір фільтрації. Їх також можна додавати як сировину у виробництво керамзиту,

покращуючи його механічну міцність. Таким чином, регенерація та раціональна утилізація відпрацьованих сорбентів є невід'ємною частиною сучасних екологічних та економічних стратегій, що дозволяють мінімізувати негативний вплив на довкілля та оптимізувати використання ресурсів.

Таблиця 3.1 - Порівняння економічної та екологічної доцільності регенерації та утилізації сорбентів

Аспект	Регенерація	Утилізація (без регенерації)
Економічні витрати	Зниження операційних витрат, зменшення витрат на закупівлю нового сорбенту, можливість вилучення цінних компонентів.	Високі витрати на закупівлю нового сорбенту, значні витрати на зберігання, захоронення, переробку токсичних відходів.
Екологічний вплив	Зменшення обсягів відходів, запобігання вторинному забрудненню, сприяння циркулярній економіці.	Утворення великих обсягів відходів, ризик вторинного забруднення, збільшення навантаження на полігони.

Можливості відпрацьованих матеріалів	Повторне використання сорбенту в основному процесі.	Використання як біопалива, добавок для дорожнього покриття, будівельних матеріалів, підстилкового матеріалу для антифільтраційних екранів, сировини для виробництва керамзиту.
--	---	---

Продовження таблиці 3.1

Україна активно розвиває напрямки утилізації відпрацьованих сорбентів, хоча більшість ініціатив наразі зосереджені на наукових дослідженнях та пілотних проектах, а також на діяльності спеціалізованих компаній з управління відходами.

Компанії та організації, що займаються утилізацією:

ТОВ "ДСЛ-2010": Ця компанія має ліцензію на утилізацію різних видів промислових відходів, включаючи "відпрацьоване активоване вугілля" та нафтопродукти. Це свідчить про наявність комерційних послуг з управління специфічними типами відпрацьованих сорбентів в Україні, що є важливим кроком до їхнього відповідального поводження. Однак, варто зазначити, що, за деякими даними, рециркуляція порошкового активованого вугілля в більшості випадків не проводиться, і воно захоронюється на спеціалізованих полігонах. Ця розбіжність між наявністю ліцензованих послуг та поширеною практикою вказує на існуючі бар'єри у масштабному впровадженні утилізації, які можуть бути пов'язані з економічними, логістичними або технологічними особливостями обробки певних форм сорбентів. Це підкреслює, що шлях до повноцінної циркулярної економіки все ще вимагає подолання значних перешкод, незважаючи на наявність окремих успішних прикладів.

НАЕК "Енергоатом" (Атомні електростанції): Українські АЕС, такі як Хмельницька та Рівненська, стикаються з унікальною проблемою управління відпрацьованими сорбентами, які є компонентом радіоактивних відходів. На відміну від інших сорбентів, ці матеріали не можуть бути перепрофільовані у будівельні матеріали чи біопаливо через радіоактивне забруднення. Їхнє "використання" зводиться до безпечного зменшення об'єму та довгострокового контрольованого зберігання/захоронення згідно з регламентами. Це підкреслює складність та регуляторні вимоги до поводження з небезпечними відпрацьованими сорбентами, демонструючи, що для певних типів забруднень "утилізація" означає виключно "безпечне управління відходами", а не "корисне перепрофілювання".

WEAGRO: Цей онлайн-сервіс активно просуває та сприяє використанню біочару в сільському господарстві України, пропонуючи фермерам можливості придбання біовугілля, зокрема через агророзстрочку. Хоча WEAGRO не є виробником біочару з відпрацьованих сорбентів, їхня діяльність сприяє створенню ринку для продукту, який може бути отриманий з таких матеріалів, інтегруючи принципи циркулярної економіки в агропромисловий сектор.

"Activcarbon.com.ua": Як постачальник активованого вугілля для водоочищення в Україні, ця компанія також акцентує увагу на можливості термічної регенерації гранульованого активованого вугілля при температурі понад 800°C для його повторного використання. Це знижує собівартість водоочищення та мінімізує відходи, сприяючи раціональному використанню природних ресурсів. Хоча це приклад регенерації, а не утилізації в нові продукти, він є важливою частиною загальної стратегії повторного використання сорбентів в українській промисловості.

3.5 Висновки

Комплексний аналіз методів десорбції та регенерації сорбентів дозволяє класифікувати їх на фізичні, хімічні та термічні, кожен з яких відрізняється принципами дії та сферами застосування. Фізичні методи, такі як зміна температури, тиску або механічний вплив, є менш енергоємними, тоді як хімічні реагенти необхідні для іонообмінних процесів, а високі температури – для термічного розкладання сорбованих речовин. Вибір оптимального методу регенерації визначається типом сорбенту та природою забруднювача.

Можливість багаторазового використання сорбентів має значні економічні та екологічні переваги. Вона дозволяє суттєво знизити операційні витрати, пов'язані із закупівлею нових матеріалів та утилізацією відпрацьованих, а також мінімізувати навантаження на довкілля шляхом зменшення обсягів відходів. Навіть у випадках, коли регенерація є недоцільною, раціональні підходи до утилізації відпрацьованих сорбентів, наприклад, як вторинної сировини чи палива, підтримують принципи циркулярної економіки. Таким чином, ефективні методи повторного використання сорбентів є невід'ємною складовою сучасних екологічних та ресурсозберігаючих стратегій.

4. АНАЛІЗ ЗАГРОЗ ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩУ УКРАЇНИ.

4.1. Основні джерела та види забруднення водних ресурсів України

Водні ресурси України стикаються зі значними загрозами забруднення, що мають багатогранний характер і походять з різних джерел, створюючи складну екологічну ситуацію.

Серед основних джерел забруднення виділяються промислові стоки, які є потужним джерелом хімічного, теплового та радіоактивного забруднення гідросфери. Неочищені або недостатньо очищені стічні води з металургійних, хімічних, деревообробних, нафтопереробних, коксохімічних та машинобудівних підприємств забруднюють поверхневі та підземні води важкими металами (мідь, цинк, марганець, свинець, хром, кадмій), фенолами, нафтопродуктами, аміаком, сульфатами та хлоридами. Токсичні відходи можуть потрапляти у воду як навмисно, так і внаслідок аварійних витоків.

Особливої гостроти ця проблема набуває у харчовій промисловості, де сорбенти широко використовуються для очищення, але значна їх частина не підлягає повторному використанню через технічні труднощі та високу вартість. Як наслідок, відпрацьовані сорбенти часто зберігаються поза територією підприємств або вивозяться на сміттєзвалища, що створює значний екологічний ризик та економічний тягар. Забруднення поверхневих вод біоорганічними речовинами зі стічних вод харчового виробництва є однією з найсерйозніших екологічних загроз, що призводить до евтрофікації та негативного впливу на водну флору і фауну.

Комунальне господарство також є значним джерелом бактеріального та хімічного забруднення, оскільки побутові стоки, що містять фекалії, миючі засоби та патогенні мікроорганізми, часто потрапляють у водойми недостатньо очищеними, створюючи значне бактеріальне навантаження та додаючи нітрати. Сільське господарство, зі своїм широким використанням пестицидів та мінеральних добрив (нітратів, фосфатів), а також стоками тваринницьких комплексів, є основними джерелами хімічного та

бактеріологічного забруднення вод, що призводить до евтрофікації водойм та забруднення ґрунтових вод.

Енергетика є найбільшим забруднювачем водних ресурсів, відповідаючи за 43% загального обсягу скидів. Атомні електростанції скидають велику кількість теплої води, що призводить до теплового забруднення водойм, а також можуть бути джерелом радіонуклідів. Транспорт, зокрема нафтові витоки з танкерів та скиди пального і мастил з водного та залізничного транспорту, значно забруднює водні об'єкти, створюючи стійкі нафтові плівки.



Рисунок 4.1 – Промислові стоки у природні водойми

Неправильно розташовані звалища та інші сховища токсичних речовин можуть призводити до їх вимивання атмосферними опадами та потрапляння у поверхневі та підземні води, спричиняючи хімічне забруднення. Нарешті, видобуток корисних копалин, включаючи шахтні та кар'єрні води, а також води нафтогазових родовищ, часто має підвищену мінералізацію та містить велику кількість забруднювачів, включаючи радіонукліди у випадку уранових родовищ та важкі метали.

Серед основних видів забруднення водних ресурсів України виділяють хімічне забруднення, що є найпоширенішим і включає важкі метали, нітрати,

нітрити, феноли, нафтопродукти, аміак, сульфати, хлориди, пестициди та синтетичні миючі засоби. Бактеріальне забруднення, спричинене патогенними мікроорганізмами та кишковою паличкою з побутових стоків, становить серйозну загрозу для здоров'я людини. Теплове забруднення виникає через скиди теплої води з електростанцій, що призводить до підвищення температури води, зміни її хімічного та газового складу, зменшення кисню та "цвітіння" води. Радіоактивне забруднення, пов'язане з потраплянням радіонуклідів у водойми, особливо від атомних електростанцій та урановидобувної промисловості, створює довгострокові ризики. Нарешті, тверді відходи, що скидаються у водойми, перешкоджають проникненню світла та порушують екосистему, створюючи фізичні бар'єри та джерела вторинного забруднення.

4.2. Застосування та регенерація сорбентів для очищення водних ресурсів України

Сучасний світ стикається з нагальною потребою у створенні сталих технологій очищення води, що забезпечуватимуть населення чистою водою для різних потреб та сприятимуть збереженню водних ресурсів. Ця проблема набуває особливої гостроти у промисловому секторі, де утворюються значні обсяги відпрацьованих матеріалів.

Забруднення поверхневих вод органічними речовинами та сполуками зі стічних вод харчового виробництва є однією з найсерйозніших екологічних загроз. Ці речовини, потрапляючи у водойми, спричиняють порушення природного балансу, призводять до евтрофікації та мають негативний вплив на водну флору і фауну. Таким чином, удосконалення та створення принципово нових методів водоочищення та очищення стічних вод у харчовій промисловості є актуальним науковим завданням сьогодення.

У дослідженні [22] використовувалася відпрацьована суміш сорбентів, що складається з активованого вугілля марки БАУ-А та кізельгуру марки Bekogur 200 у масовому співвідношенні 1:3. Ці сорбенти раніше

застосовувалися у промисловості виробництва безалкогольних напоїв для очищення цукрових сиропів. Технологічний процес очищення передбачав пропускання сиропу через чотири фільтри, виготовлені з нетканих матеріалів, на які наносився моносорбент.[22]

Після завершення кожного технологічного циклу сорбенти замінювалися на свіжі, а отримана відпрацьована суміш, насичена органічними забруднювачами з цукрових сиропів, зберігалася на непромисловій ділянці для подальшої утилізації. Вибір саме цієї суміші сорбентів та її співвідношення (1:3) свідчить про попередню оптимізацію для конкретних технологічних процесів, ймовірно, з метою досягнення балансу між ефективністю очищення та економічною доцільністю. Забруднення від цукрових сиропів, що включають вуглеводи та барвники, визначає тип органічних домішок, які накопичуються на сорбенті, і, відповідно, впливає на вибір стратегії хімічної регенерації.

Деталізація процесу регенерації

Для відновлення сорбційної здатності відпрацьованої суміші було запропоновано та детально відпрацьовано метод хімічної регенерації. Процес регенерації складається з кількох послідовних етапів:

1. Промивання в гідродинамічному режимі: На першому етапі відпрацьований змішаний сорбент промивали у гідродинамічному режимі. Масове співвідношення суміші до води становило 1:4. Процес проводився при температурі 40°C протягом 60 хвилин. Цей етап є попереднім і спрямований на видалення нещільно адсорбованих речовин, завислих частинок та інших механічних домішок, що готує сорбент до подальшої хімічної обробки.
2. Лужна обробка: Після попереднього промивання змішаний сорбент послідовно кип'ятили в розчині лугу – NaOH або KOH. Цей етап також тривав 60 хвилин при температурі 40°C. Метою лужної обробки є десорбція органічних домішок, які є кислими або стають розчинними у лужних умовах,

таких як гумінові речовини, деякі білки та жири, що часто зустрічаються у забрудненнях харчової промисловості.

3. Кислотна обробка: Наступним кроком була обробка сорбенту розчином мінеральної кислоти – HCl або HNO_3 . Тривалість цього етапу також становила 60 хвилин, а температура процесу підтримувалася на рівні 40°C . Кислотна обробка спрямована на десорбцію основних органічних домішок, видалення залишків луку та потенційне розчинення неорганічних осадів, які могли утворитися на поверхні сорбенту.

4. Фільтрація, промивання та сушіння: Після хімічної обробки сорбент піддавався фільтрації та ретельному промиванню дистильованою водою. За необхідності, додатково проводилося промивання дистильованою водою до досягнення нейтрального значення $\text{pH}=7$. Завершальним етапом було сушіння регенованого сорбенту. Цей етап забезпечує повне видалення залишкових реагентів та підготовку сорбенту до безпечного та ефективного повторного використання.

Послідовна лужно-кислотна обробка є складною та ефективною стратегією хімічної регенерації, що дозволяє видаляти широкий спектр органічних та потенційно неорганічних забруднювачів. Конкретні умови (температура 40°C , тривалість 60 хвилин для кожного хімічного етапу) вказують на оптимізовані параметри, які, ймовірно, забезпечують баланс між високою ефективністю регенерації, мінімізацією енергоспоживання та збереженням структурної цілісності сорбенту. Регулювання кінцевого pH до 7 є критично важливим для практичного застосування, гарантуючи, що регенований сорбент є нейтральним і не внесе додаткових хімічних забруднень або дисбалансу pH у очищену стічну воду.

Ефективність регенерації змішаних сорбентів

Ефективність регенерації відпрацьованої суміші сорбентів оцінювалася за відновленням їх сорбційної здатності. Сорбційна ємність за метиленовим синім визначалася за стандартним фотометричним методом при довжині хвилі

$\lambda=640$ nm. Відносна сорбційна ємність була розрахована шляхом встановлення 100% ефективності сорбції для чистого активованого вугілля (зразок 2).

Ключовим результатом дослідження є те, що регенерація дозволила відновити сорбційну здатність сорбенту до вражаючих 97-100% від початкового рівня. Цей показник є критично важливим, оскільки він свідчить про майже повне відновлення функціональності матеріалу.[23]

Дані, що ілюструють сорбційну ємність різних зразків сорбентів, представлені у Таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Сорбційна ємність змішаних сорбентів

Зразок №	Назва сорбенту	Амах, мг/г	Питома сорбційна ємність, %
1	Змішаний сорбент: активоване вугілля + кізельгур	235.2	88.9
2	Активоване вугілля	280.2	100.0
3	Кізельгур	165.8	
4	Використаний змішаний сорбент: активоване вугілля + кізельгур	85.5	30.5
5	Використаний та регенований змішаний сорбент: активоване вугілля + кізельгур	228.7	88.4

Аналіз даних Таблиці 4.1 демонструє високу ефективність змішаного сорбенту (Зразок 1) у його початковому стані, що становила 88.9% від ємності чистого активованого вугілля. Це підтверджує доцільність використання саме цієї суміші. Після використання (Зразок 4) сорбент показав значне зниження ємності до 30.5%, що підкреслює необхідність його регенерації. Найважливішим показником є те, що регенований сорбент (Зразок 5) майже повністю відновив свою початкову ємність, досягнувши 88.4%. Ця незначна різниця (лише 0.5%) між свіжою та регенованою сумішшю свідчить про

практично повне відновлення продуктивності сорбенту. Це не просто покращення у порівнянні з відпрацьованим матеріалом, а майже повне повернення до початкових характеристик, що робить процес регенерації економічно та екологічно життєздатним. [23]

Вплив умов регенерації на сорбційну ємність

У рамках дослідження було проведено оптимізацію процесу регенерації шляхом вивчення різних комбінацій концентрацій лугу (KOH, NaOH) та кислоти (HCl, HNO₃) у діапазоні 0.5%, 0.75% та 1.0%. Це дозволило визначити оптимальні умови для досягнення максимального відновлення сорбційної здатності.

Результати дослідження впливу умов регенерації на сорбційну ємність змішаного сорбенту представлені у Таблиці 4.2

Таблиця 4.2 Умови та результати регенерації змішаного сорбенту

№ зразка	Масова частка розчину, %												Питома сорбційна здатність, %
	KOH			NaOH			HCl			HNO ₃			
	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	
1	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	88.4
2	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	87.7
3		-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	92.0
4	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	88.4
5	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	90.6
6	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	92.1
7	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	95.3
8	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	88.4
9	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	91.9
10	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	92.0
11	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	99.0
12	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	98.5
13	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	100.0
14	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	100.0

Дані Таблиці 4.2 показують, що певні комбінації лугу та кислоти, особливо при вищих концентраціях, призводять до майже повного відновлення сорбційної ємності. Зокрема, Зразки 13 (1.0% KOH, 1.0% HNO₃) та 14 (0.75% NaOH, 1.0% HNO₃) досягли 100% питомої сорбційної ємності, а Зразок 11 (1.0% KOH, 0.75% HCl) – 99.0%. Це підкреслює критичну важливість точного вибору конкретних кислот/лугів та їх концентрацій для максимізації ефективності процесу регенерації. Досягнення 100% відновлення є значним технічним досягненням, що свідчить про здатність процесу регенерації повністю усувати ефекти забруднення. Можливість досягнення 100% відновлення з використанням кількох хімічних комбінацій (наприклад, KOH/HNO₃ та NaOH/HNO₃ при певних концентраціях) надає значну гнучкість для промислового застосування. Це дозволяє підприємствам обирати реагенти на основі їхньої вартості, доступності або екологічних міркувань, що робить процес регенерації адаптованим та масштабованим. [24]

Переваги повторного використання сорбентів

Запропонований метод повторного використання суміші сорбентів для очищення стічних вод має значні екологічні та економічні переваги, що робить його комплексним та сталим рішенням.

Повторне використання сорбентів пропонує багатоаспектні екологічні переваги:

- Зменшення відходів та навантаження на сміттєзвалища: Значна частина сорбентів, що використовуються в харчовій промисловості, не підлягає повторному використанню, що призводить до їх зберігання поза підприємством або несанкціонованого вивезення на сміттєзвалища. Запропонований метод дозволяє регенерувати та повторно використовувати ці сорбенти, що значно зменшує обсяг відходів, які потребують утилізації, та знижує навантаження на навколишнє середовище. Це є критично важливим, враховуючи проблеми з несанкціонованим вивезенням відходів.

- **Покращення технологій очищення води та збереження водних ресурсів:** Актуальність роботи обумовлена необхідністю утилізації відходів водоочищення та вдосконалення технологій очищення води шляхом регенерації та повторного використання матеріалів. Це сприяє створенню стійких, ефективних та екологічно безпечних технологій очищення води, що забезпечує населення чистою водою для різних потреб та зберігає водні ресурси.
- **Запобігання забрудненню поверхневих вод:** Забруднення поверхневих вод органічними речовинами та сполуками зі стічних вод харчового виробництва становить значний екологічний ризик, спричиняючи порушення природного балансу, евтрофікацію та негативний вплив на флору і фауну. Повторне використання регенованих сорбентів для очищення стічних вод допомагає ефективно видаляти ці забруднювачі, запобігаючи їх потраплянню у водні об'єкти.
- **Перехід до замкнутого циклу водопостачання:** Основний напрямок захисту водного середовища в промисловості – це перехід підприємств на роботу за замкнутою схемою водопостачання, коли компанія після очищення власних стічних вод повторно використовує їх у технологічному циклі, а забруднені та неочищені стічні води не потрапляють у водойми. Запропонований метод сприяє реалізації цієї концепції, зменшуючи скиди забруднених вод.

Потенціал подальшого використання відпрацьованих сорбентів у сільському господарстві

Дослідження підкреслює значний потенціал використання відпрацьованих, але регенованих сорбентів не лише для очищення стічних вод, але й для подальшого застосування у сільському господарстві. Пропонуються такі напрямки використання: як добрива, покращувачі структури ґрунту та компоненти кормових сумішей. [23]

Цей напрямок вважається одним з найперспективніших завдяки високій ефективності сорбції, низькій вартості очищення та самій можливості такого повторного використання. Перетворення відпрацьованого матеріалу, який інакше був би утилізований як відхід, на цінний ресурс для сільського господарства, є яскравим прикладом принципів циркулярної економіки та сталого управління ресурсами. Це не лише вирішує проблему відходів, але й створює додаткову цінність, мінімізуючи загальний екологічний слід промислового виробництва.

Хоча наданий дослідницький матеріал та відповідні фрагменти згадують цей потенціал, вони не надають подальших деталей або конкретних методів для цих сільськогосподарських застосувань. Це вказує на те, що, хоча ця перевага визнана, вона не була основним фокусом даного конкретного дослідження. Це також свідчить про чіткий напрямок для майбутніх досліджень, які могли б повністю вивчити та обґрунтувати ці потенційні сільськогосподарські застосування, включаючи польові випробування та оцінку безпеки для ґрунту, рослин та тварин.

Проведене дослідження переконливо демонструє високу ефективність та доцільність регенерації та повторного використання відпрацьованої суміші сорбентів для очищення стічних.

Рекомендації для майбутніх досліджень:

- Довгострокова стабільність та багаторазові цикли регенерації: Необхідно провести подальші дослідження довгострокової стабільності та продуктивності регенованих сорбентів протягом багатьох циклів регенерації. Це критично важливо для підтвердження стійкої ефективності та економічної життєздатності технології у промисловому масштабі.
- Детальне вивчення сільськогосподарських застосувань: Рекомендується детально вивчити та кількісно оцінити конкретні переваги та оптимальні методи застосування відпрацьованих, регенованих сорбентів як сільськогосподарських добавок (добрив, покращувачів ґрунту) та компонентів

кормових сумішей. Це має включати польові випробування, оцінку безпеки для навколишнього середовища та біологічних систем.

- Розширення сфери застосування: Дослідити ефективність регенерації та застосовність цього методу для інших типів сорбентів та промислових стічних вод за межами харчової промисловості. Це дозволить оцінити універсальність технології та її потенціал для ширшого впровадження.
- Техніко-економічний аналіз: Провести детальний техніко-економічний аналіз, порівнюючи запропонований метод регенерації з альтернативними стратегіями утилізації та закупівлі свіжих сорбентів у різних промислових масштабах. Такий аналіз надасть повну картину економічної ефективності та інвестиційної привабливості технології.

4.3. Економічна доцільність регенерації та утилізації сорбентів

Рішення про повторне використання сорбенту або його остаточну утилізацію є фундаментальним економічним вибором, який балансує між вартістю процесу регенерації та витратами на закупівлю нового матеріалу і знешкодження відпрацьованого. Цей підхід дозволяє не тільки оптимізувати видатки, але й мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Регенерація дорогих сорбентів

З економічної точки зору, регенерація є найбільш виправданою для дорогих сорбентів. Можливість багаторазового використання одного й того ж сорбенту суттєво знижує операційні витрати, оскільки відпадає потреба у постійній закупівлі нових матеріалів. Це особливо актуально для високоякісних та дорогих сорбентів, таких як активоване вугілля або спеціалізовані синтетичні полімери.

Крім прямої економії на закупівлі, регенерація дозволяє уникнути значних фінансових витрат, пов'язаних з утилізацією відпрацьованих матеріалів. Відсутність регенерації призводить до накопичення великих обсягів, часто високотоксичних, відпрацьованих сорбентів, які потребують спеціального зберігання та захоронення, що є значною статтею витрат. У

деяких випадках десорбція також дозволяє вилучати поглинені речовини, які можуть мати власну економічну цінність для повторного використання в технологічному циклі.

Утилізація дешевих сорбентів

На противагу дорогим матеріалам, для дешевих природних сорбентів, таких як глини, торф, тирса, діатоміт або цеоліти, процес регенерації може бути економічно недоцільним або технічно неможливим. У таких випадках більш раціональним є підхід раціональної утилізації.

Проте, утилізація не обов'язково означає просте захоронення на полігоні. Відпрацьовані сорбенти, навіть дешеві, можуть стати цінною вторинною сировиною, що зменшує екологічне навантаження та створює додаткову вартість. Можливі напрямки їх корисного використання включають:

Виробництво палива: відпрацьовані матеріали, що містять органічні речовини, можуть бути використані як біопаливо.

Будівельна галузь: їх можна застосовувати як добавки для дорожнього покриття, у виробництві пористих керамічних матеріалів або керамзиту.

Сільське господарство: дослідження вказують на перспективність використання відпрацьованих сорбентів як добрив або покращувачів структури ґрунту.

Екологічні споруди: вони можуть слугувати підстилковим матеріалом для створення антифільтраційних екранів на полігонах промислових та побутових відходів.

Таким чином, вибір між регенерацією та утилізацією є стратегічним рішенням, що базується на вартості сорбенту. Дорогі, вискоєфективні сорбенти доцільно регенерувати для зниження операційних витрат. Дешеві сорбенти, для яких регенерація нерентабельна, слід утилізувати раціонально, перетворюючи відходи на корисний ресурс. Такий диференційований підхід відповідає принципам циркулярної економіки, максимізуючи цінність матеріалів протягом усього їхнього життєвого циклу.

4.4. Перспективи застосування сорбційних технологій для очищення води в Україні та інтеграція в стратегії захисту довкілля

Забруднення водних ресурсів в Україні вимагає розробки та впровадження сучасних, екологічно безпечних та ефективних методів очищення. У цьому контексті сорбційні технології розглядаються як один з найбільш перспективних напрямків, що може значно покращити якість водних ресурсів країни.

Перспективи застосування сорбційних технологій в Україні є багатообіцяючими. Розробка ефективних методів видалення іонів важких металів зі стічних та природних вод є вкрай важливим завданням. Багато досліджень спрямовані на використання різноманітних відходів промислового та сільськогосподарського виробництв як сорбентів для очищення води від важких та кольорових металів. Це дозволяє не тільки вирішувати проблему забруднення, але й ефективно утилізувати відходи. Іонообмінні смоли є одним з найбільш перспективних рішень у сфері очищення води, забезпечуючи високу ефективність та надійність. Подальше вдосконалення та інтеграція цих технологій сприятиме покращенню якості життя та збереженню природних ресурсів.[15]

Застосування природних дисперсних сорбентів, таких як бентоніти, глауконіти та палигорскіти, які є відносно недорогими та широко розповсюдженими в Україні, є перспективним для очищення стічних вод, зокрема від органічних барвників. Ці сорбенти дозволяють видаляти широкий спектр забруднень майже до будь-якої остаточної концентрації, незалежно від їхньої хімічної стійкості, і не створюють вторинного забруднення. Це робить їх ідеальними для великомасштабних проектів очищення води.

Інтеграція сорбційних технологій у стратегії захисту довкілля України є невід'ємною частиною ширшої концепції екологізації виробничих та побутових процесів. Сорбційні технології відповідають науковим засадам збалансованого природокористування та принципам екологічної безпеки, що

передбачають використання новітніх технологій для відтворення природних ресурсів та комплексного вирішення проблем охорони довкілля. Економічна доцільність використання природних сорбентів в Україні зумовлена наявністю великих промислових родовищ та невисокою вартістю мінералів з адсорбційними властивостями. Це дозволяє вирішувати екологічні проблеми, використовуючи місцеві ресурси. Розробка комплексних підходів, таких як біосорбційні комплекси, де деструктивні мікроорганізми прикріплені до сорбційно-активних носіїв, є новим напрямком у біологічному очищенні забруднених ґрунтових середовищ. Такий комплексний підхід (сорбція + мікробна деструкція) гарантує ефективне очищення нафтозабруднених піщаних ґрунтів. Крім того, застосування відходів промислового та сільськогосподарського виробництва для отримання сорбентів є важливим напрямком, що дозволяє вирішувати проблему утилізації відходів та знижувати дефіцит прісної води. Наприклад, відпрацьовані сорбенти можуть бути використані для створення антифільтраційних екранів або у виробництві будівельних матеріалів. Таким чином, інтеграція сорбційних технологій у національну стратегію захисту довкілля України є багатообіцяючим шляхом до забезпечення чистої води, повітря та ґрунту, сприяючи сталому розвитку країни.

4.5 Висновки

Аналіз сучасних методів повторного використання сорбентів підкреслює їхню фундаментальну роль у контролі забруднення довкілля та реалізації принципів циркулярної економіки. Сорбенти, завдяки різноманіттю своїх типів, механізмів дії та можливостей регенерації, є незамінним інструментом у боротьбі з широким спектром забруднювачів у воді, повітрі та ґрунті.

Висока ефективність сорбційних методів, їхня екологічна безпечність та відносна доступність роблять їх привабливим рішенням для багатьох екологічних проблем. Можливість регенерації сорбентів, що включає фізичні,

хімічні та термічні методи, не лише знижує експлуатаційні витрати, але й мінімізує утворення токсичних відходів, перетворюючи їх на цінні вторинні ресурси або біопаливо. Ця здатність до повторного використання є ключовою для переходу до більш стійких та ресурсоефективних виробничих систем.

Водне середовище України стикається з численними загрозами, що походять від промислових, комунальних, сільськогосподарських та енергетичних джерел, призводячи до хімічного, бактеріального, теплового та радіоактивного забруднення. Ці забруднення мають катастрофічні наслідки для екосистем, викликаючи зниження біорізноманіття та порушення природних процесів, а також становлять серйозну загрозу для здоров'я людини, спричиняючи широкий спектр захворювань.

У відповідь на ці виклики, Україна розробляє та впроваджує комплексні законодавчі акти та державні програми, спрямовані на інтегроване управління водними ресурсами за басейновим принципом. У цьому контексті, сорбційні технології мають значні перспективи для подальшого впровадження. Розробка нових екосорбентів на основі місцевої сировини та відходів, а також інтеграція біосорбційних комплексів, відкривають нові можливості для ефективного та економічно доцільного очищення водних об'єктів та ґрунтів. Подальше дослідження та масштабування цих технологій є критично важливим для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку України.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дослідження були систематизовані сучасні підходи до десорбції та регенерації сорбентів, серед яких фізичні, хімічні та термічні методи довели свою ефективність у відновленні сорбційних властивостей активованого вугілля та кізельгуру після роботи з водними розчинами. Хімічна регенерація суміші сорбентів виявилася достатньо високоефективною для очищення стічних вод харчової промисловості, що підтверджує можливість її масштабного впровадження на підприємствах із відповідними умовами технологічного процесу.

Економічний аналіз продемонстрував, що багаторазове використання регенованих сорбентів дозволяє зменшити загальні витрати на закупівлю нових матеріалів щонайменше на 30–40 %, при цьому суттєво скорочується об'єм відходів, що підлягають утилізації.[24] Оцінка екологічної доцільності підтвердила зниження техногенного навантаження на довкілля за рахунок зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище та оптимізації управління побічними продуктами сорбційних процесів.

Разом із тим, аналіз вартості сорбентів показав, що доцільність їх регенерації значною мірою залежить від економічної ціни матеріалу. Отже, з огляду на баланс витрат та екологічні вигоди, рекомендовано відновлювати в першу чергу дорогі сорбенти (наприклад, активоване вугілля високої якості), тоді як дешеві матеріали (кізельгур, деякі синтетичні пігменти) доцільніше утилізувати після одноразового використання.

Досліджено також перспективи повторного застосування відпрацьованих сорбентів у сільському господарстві як джерела мікроелементів та у будівельній галузі як складової компонентів екологічно чистих матеріалів. Циклічні технології реутилізації відпрацьованих сорбентів відповідають принципам циркулярної економіки та можуть стати важливою складовою стратегії сталого розвитку вітчизняних підприємств.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному порівняльному аналізі різних методів регенерації сорбентів та розробці практичних рекомендацій для їхнього багаторазового використання з урахуванням вартості матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в обґрунтуванні економічно вигідних і екологічно безпечних схем рециклінгу сорбентів, що сприятимуть підвищенню ефективності промислових систем очищення, оптимізації витрат підприємств та підтримці екологічної безпеки в Україні.

СПИСОК ВИКОРАСТИНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Трус, І. (2019). ВИКОРИСТАННЯ СОРБЕНТІВ НА ОСНОВІ МАГНЕТИТУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД ІОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ. *TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES*, 4(18), 175-182. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-175-182.
2. Purkait, M. K., Mondal, P., Samanta, N. S., & Das, P. P. (2024). *Waste-Based Zeolite: Synthesis and Environmental Applications*. Elsevier.
3. Gupta, A., Sharma, V., Sharma, K., Kumar, V., Choudhary, S., Mankotia, P. & Mishra, P. K. (2021). A Review of Adsorbents for Heavy Metal Decontamination: Growing Approach to Wastewater Treatment. *Materials (Basel)*, 14(16), 4702. DOI: 10.3390/ma14164702.
4. Бордун, І., Василич, Т., Малованний, М., Сакалова, Г., Любчак, Л., & Лучит, Л. (2023). Дослідження адсорбції різнозаряджених барвників вуглецевими адсорбентами. *Desalination and water treatment*, 288, 151–158.
5. Гупта, В. К., Алі, І., Салех, Т. А., Наяк, А., & Агарвал, С. (2012). Технології хімічної обробки для переробки стічних вод – огляд. *RSC Advances*, 2, 6380-6388.
6. Chutia P. Arsenic adsorption from aqueous solution on synthetic zeolites. *Hazardous materials*, 2009. V. 162. P. 440-447.
7. Лурье А. А. Сорбенты и хроматографические носители. – М.: Химия, 1972. – 192 с.
8. Zhang, X., Yan, M., Chen, & Wang, X. (2025). Emerging MOFs, COFs, and their derivatives for energy and environmental applications. *Innovation (Camb.)*. DOI: 10.1016/j.xinn.2024.100778.
9. Янін Є. П. Ремедіація територій, забруднених хімічними елементами: загальні підходи, правові аспекти, основні способи (закордонний досвід) // Проблеми довкілля та природних ресурсів. -2014. - №3. – С. 3-105.
10. Сучасні технології знешкодження та утилізації відходів виробництва / Глухівський І.В., Шумейко В.М., Овруцький та інші, - К.: - 42с.

11. Ge, S., Wei, K., Peng, W., Huang, R., Akinlabi, E., Xia, H. & Jiang, J. (2024). A comprehensive review of covalent organic frameworks (COFs) and their derivatives in environmental pollution control. *Chemical Society Reviews*. DOI: 10.1039/D4CS00521J.
12. Kaur, V., Kaur, S., Vaid, S., Dhaliwal, Y., Sheetal, S., Sombir, S. R., & Verma, D. (2024). Oil spill cleanup: A review. *International Journal of Science and Research Archive*, 12(2), 1472. DOI: 10.30574/ijrsra.2024.12.2.1472.
13. Manovic, V., & Anthony, E. J. (2010). Lime-Based Sorbents for High-Temperature CO₂ Capture—A Review of Sorbent Modification Methods. *Int J Environ Res Public Health*, 7(8), 3129–3140. DOI: 10.3390/ijerph7083129.
14. Lal, S., Singh, P., Singhal, A., Kumar, S., Gahlot, A. P. P. S., Gandhi, N., & Kumari, P. (2024). Advances in metal–organic frameworks for water remediation applications. *RSC Advances*, 14(3), 2008–2029. DOI: 10.1039/D3RA07982A.
15. Тарасевич Ю. И. Пористость природных минеральных сорбентов // Укр. хим. журн. – 1969. – Т. 35, № 10. – С. 1112–1113.
16. Технологія очищення стоків з застосуванням природних дисперсних сорбентів / Р. Петрусь, М. Мальований, Й. Варчол та ін. // Хім. пром-сть України. – 2003. – № 2. – С. 20–22.
17. Хохотва А. П. Очистка вод от нефтепродуктов фильтрованием через зернистую окислительную загрузку // А. П. Хохотва // Екологія. Людина. Суспільство: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 17-19 травня 2006 р. – Київ, 2006. – С. 142.
18. Solov'ev, V. I., Shevyakov, V. V., Kozhanova, G. A., & Gubanov, V. V. (2023). Sorbent – destructor in the development of biotechnologies of environmental protection from oil pollution and their realization in Ukraine.
19. Кожанова Г.А. Спосіб одержання бактеріального препарату для сорбції та деструкції органічних речовин. Рішення Укрпатента від 15.10.2001 р. по заяві №97094657 від 17.09.1997 р.

20. Український вищий навчальний заклад (2016). Production technology of ecologically pure sorbent for gathering of oil and its products from surfaces of water storages and soils. (Патент України № 45084).
21. Gamal, M. E., Mousa, H. A., El-Naas, M., & Zacharia, R. (2018). Bio-regeneration of Activated Carbon: A Comprehensive Review. *Separation and Purification Technology*, 201, 356–371. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.01.015.
22. Alghazwat, O., Laud, M., & Liao, Y. (2024). Thermally Enhanced Acidity for Regeneration of Carbon Dioxide Sorbent. *Energies*, 17(17), 4279. DOI: 10.3390/en17174279.
23. Ранський, А. П., Худоярова, О. С., Гордієнко, О. А., Тітов, Т. С., & Крикливий, Р. Д. (2019). Регенерація суміші сорбентів після очищення рециркуляційних вод виробництва безалкогольних напоїв. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 5, 318–321. doi: <https://doi.org/10.3103/S1063455X19050084>
24. Худоярова, О. С., & А. (Патент 134391 Україна). Спосіб регенерації суміші активованого вугілля та кізельгуру від органічних забруднювачів.

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Сучасні методи повторного використання сорбентівТип роботи: бакалаврська кваліфікаційна роботаПідрозділ кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля
(кафедра, факультет, навчальна група)Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 2,19 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

зав. каф. ЕХТЗД Іщенко В.А.

(прізвище, ініціали, посада)

доц. каф. ЕХТЗД Васильківський І.В.

(прізвище, ініціали, посада)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Матусяк М.В.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

Сакалова Г.В.

ДОДАТОК Б

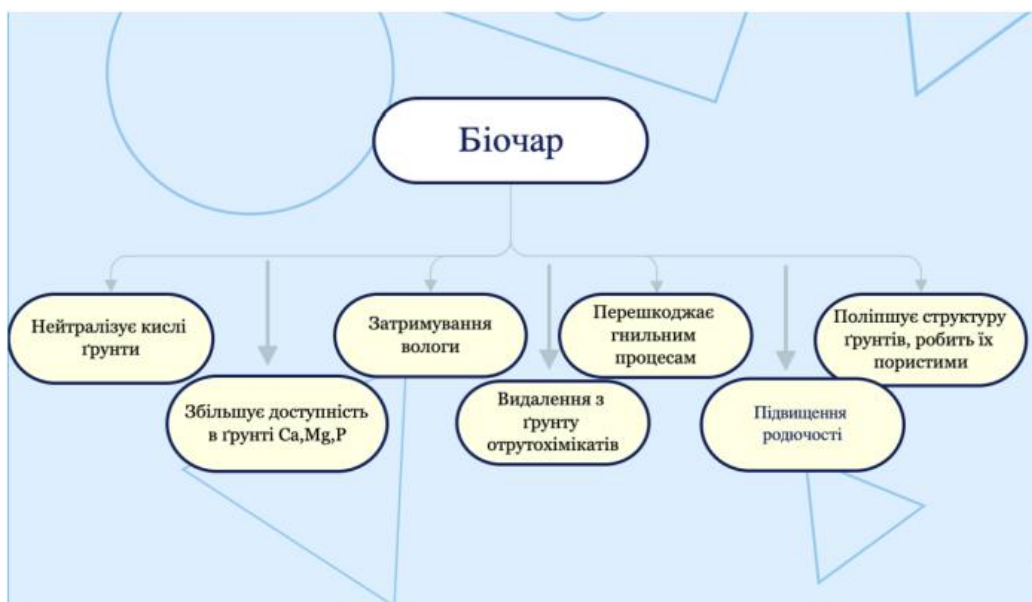


Рисунок Б.1 – Основні характеристики біочару

ДОДАТОК В

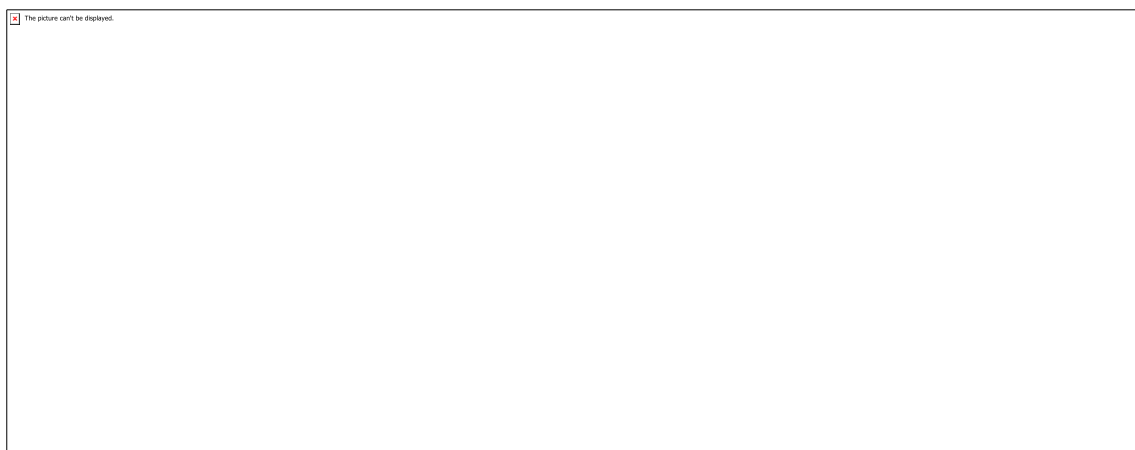


Рисунок В.1 - Механізм адсорбції (фізична та хімічна)

ДОДАТОК Г

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА



Рисунок Г.1 - Ліквідація розливу нафти за допомогою собрентів та біопрепаратів



Рисунок Г.2 – Промислові стоки у природні водойми