

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВОЛИНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ

Кафедра екології та охорони навколишнього середовища

На правах рукопису

ДУБЕНСЬКА ВІРА ТАРАСІВНА

**ЕКОЛОГІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ВИКОРИСТАННЯ БІОВУГІЛЛЯ ЯК
СОРБЕНТА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД**

Спеціальність 101 «Екологія»

Освітньо-професійна програма «Екологія»

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»

Науковий керівник:

**ЛАВРИНЮК ЗОРЯНА
ВОЛОДИМИРІВНА,**

кандидат хімічних наук, доцент

РЕКОМЕНДОВАНО ДО ЗАХИСТУ

Протокол №4
засідання кафедри екології та
охорони навколишнього
середовища
від 18 листопада 2025 р.
Завідувач кафедри



доц. Радзій В.Ф.

ЛУЦЬК-2025

АНОТАЦІЯ

Дубенська В. Т. Екологічний потенціал використання біовугілля як сорбента для очистки стічних вод. На правах рукопису.

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 101 Екологія. Волонський національний університет імені Лесі Українки. Луцьк, 2024.

У магістерській кваліфікаційній роботі досліджено екологічний потенціал застосування біовугілля як сорбента для очищення стічних вод. Актуальність теми обумовлена необхідністю ефективного видалення органічних забруднювачів, барвників і важких металів за допомогою доступних та екологічно безпечних матеріалів.

У першому розділі проаналізовано теоретичні аспекти застосування біовугілля, його будову, склад, механізми адсорбції та екологічні переваги використання у водоочистці. У другому розділі подано методи та матеріали дослідження: експериментальні підходи до визначення впливу початкової концентрації забруднювача, дози біовугілля, рН розчину та часу контакту на ефективність очищення. Детально наведено умови проведення лабораторних робіт та опис приладів. У третьому розділі наведено результати експериментів та їх екологічний аналіз. Встановлено, що ефективність сорбції зростає зі зменшенням початкової концентрації забруднювача та збільшенням дози біовугілля і часу контакту. Найвища ефективність досягнута за нейтрального та слабколужного середовища. Надано оцінку екологічних переваг і можливих ризиків використання біовугілля.

Робота підтверджує перспективність застосування біовугілля як ефективного й екологічно безпечного сорбента для очищення стічних вод.

Ключові слова: біовугілля, адсорбція, стічні води, забруднювачі, малахітовий зелений, сорбент, екологічний аналіз, рН, концентрація, час контакту.

ANNOTATION

Dubenska V. T. Environmental potential of using biochar as a sorbent for wastewater treatment. Manuscript.

Qualification work for obtaining a Master's degree in specialty 101 Environmental Studies, educational-professional program Environmental Studies. Lesya Ukrainka Volyn National University. Lutsk, 2025.

The master's thesis investigates the environmental potential of applying biochar as a sorbent for wastewater treatment. The relevance of the topic is determined by the need for efficient removal of organic pollutants, dyes, and heavy metals using accessible and environmentally safe materials.

The first chapter analyzes the theoretical aspects of biochar application, its structure, composition, adsorption mechanisms, and environmental advantages in water purification. The second chapter presents the methods and materials of the study, including experimental approaches to determining the influence of the initial pollutant concentration, biochar dosage, solution pH, and contact time on purification efficiency. Laboratory conditions and instrument descriptions are provided in detail. The third chapter contains the experimental results and their environmental assessment. It was established that adsorption efficiency increases with decreasing initial pollutant concentration and increasing biochar dosage and contact time. Maximum effectiveness was achieved under neutral and slightly alkaline conditions. The ecological benefits and potential risks of using biochar are also evaluated.

The research confirms the prospects of using biochar as an effective and environmentally safe sorbent for wastewater treatment.

Keywords: biochar, adsorption, wastewater, pollutants, malachite green, sorbent, environmental analysis, pH, concentration, contact time

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ БІОВУГІЛЛЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД.....	9
1.1. Визначення поняття «біовугілля» та екологічні переваги використання його для очистки стічних вод.....	9
1.2. Склад та структура біовугілля.....	11
1.3. Процеси взаємодії біовугілля зі стічними водами.....	13
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	20
2.1. Методи очищення стічних вод.....	20
2.2. Матеріали та методики лабораторних досліджень.....	21
2.3 Методи аналізу та обробки експериментальних даних.....	24
РОЗДІЛ 3. ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ БІОВУГІЛЛЯ НА ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД.....	27
3.1.Характеристика результатів етапів дослідження впливу біовугілля на очищення стічних вод.....	27
3.2. Екологічні перспективи використання біовугілля для очищення стічних вод.....	37
3.3. Оцінка ефективності застосування біовугілля та можливі екологічні ризики.....	41
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	46

ВСТУП

Актуальність теми: Забезпечення якості водних ресурсів є однією з найважливіших екологічних проблем сучасності. Зростання промислового виробництва, урбанізація та інтенсифікація сільського господарства призводять до збільшення обсягу стічних вод, які містять широкий спектр забруднювачів. Традиційні методи очищення стічних вод не завжди забезпечують достатню ефективність, особливо щодо видалення стійких органічних забруднювачів та важких металів.

У цьому контексті використання біовугілля є перспективним напрямом використання в очищенні води завдяки його високій адсорбційній здатності, економічній доступності та екологічній безпеці. Біовугілля, виготовлене з відновлюваних біомасних матеріалів, таких як деревина, солома, шкаралупа горіхів, не лише сприяє зменшенню обсягів відходів, але й забезпечує ефективне видалення широкого спектру забруднювачів зі стічних вод.

Дослідження екологічного потенціалу застосування біовугілля для очищення стічних вод є актуальним з огляду на такі фактори: ефективність видалення забруднювачів: необхідність вивчення та підтвердження здатності біовугілля ефективно видаляти різні типи забруднювачів, включаючи важкі метали, органічні речовини та мікроорганізми; стійкість та регенерація: оцінка довговічності біовугілля та можливостей його регенерації після кількох циклів використання, що важливо для економічної ефективності та зменшення експлуатаційних витрат; екологічна безпека: аналіз впливу використання та утилізації біовугілля на навколишнє середовище, включаючи можливості повторного використання та остаточного видалення. Зменшення викидів парникових газів: використання біовугілля, виготовленого з відновлюваних ресурсів, сприяє зменшенню викидів вуглецю в атмосферу, що є важливим аспектом у боротьбі зі зміною клімату.

Мета дослідження: Вивчити екологічний потенціал та переваги використання біовугілля як сорбента для очищення стічних вод,

зосереджуючи увагу на його впливі на зменшення забруднення, покращення якості води та стійкість до повторного використання.

Для досягнення мети досліджень були поставлені такі *завдання*:

- провести порівняльний аналіз біовугілля та активованого вугілля, визначити їхні спільні та відмінні екологічні характеристики.
- дослідити залежність фізико-хімічних властивостей біовугілля від типу біомаси та температури піролізу.
- визначити домінуючі механізми сорбції для різних груп забруднювачів (метали, органіка, барвники).
- здійснити порівняльну оцінку традиційних методів очищення та адсорбційних методів із застосуванням біовугілля.
- оптимізувати лабораторний протокол для підвищення точності адсорбційних експериментів (перемішування, час, дозування).
- провести моделювання адсорбції за допомогою ізотерм Ленгмюра та Фрейндліха і порівняти якість їхньої апроксимації.
- встановити оптимальні умови адсорбції (доза, рН, концентрація, час) для досягнення максимальної ефективності.
- оцінити довгостроковий вплив використаного біовугілля на довкілля при його утилізації або повторному застосуванні.
- визначити потенційні ризики вторинного забруднення (вимивання металів, органіки) та запропонувати шляхи їх мінімізації.

Об'єкт дослідження - біовугілля та його використання у процесах очищення стічних вод.

Предмет дослідження – екологічний потенціал застосування біовугілля як сорбента для очищення стічних вод, включаючи його ефективність та процеси у видаленні забруднювачів, вплив на якість води, можливість повторного використання, екологічну безпеку та економічну доцільність.

Методи дослідження: у дослідженні використано спектрофотометричний аналіз для визначення концентрації малахітового зеленого, серію лабораторних адсорбційних експериментів із варіюванням концентрації забруднювача, рН, дози біовугілля та часу контакту. Отримані результати опрацьовано статистичними методами для оцінки точності та надійності експерименту.

Інформаційну базу дослідження становили: наукові публікації зарубіжних авторів, що присвячені застосуванню біовугілля у процесах очищення води, сучасні методичні рекомендації з проведення адсорбційних досліджень, нормативні документи у сфері водоочищення та охорони довкілля, а також експериментальні дані, отримані під час лабораторних досліджень ефективності адсорбції малахітового зеленого біовугіллям. Додатково використано інформацію з довідкових матеріалів, електронних баз даних та наукових оглядів щодо фізико-хімічних властивостей біовугілля та механізмів адсорбції.

Наукова новизна: встановлено залежність ефективності адсорбції малахітового зеленого біовугіллям від концентрації забруднювача, дози сорбента, рН та часу контакту. Визначено оптимальні умови очищення та оцінено екологічні переваги й можливі ризики застосування біовугілля.

Практичне значення одержаних результатів: отримані результати підтверджують ефективність біовугілля як доступного та екологічно безпечного сорбента для очищення стічних вод. Визначені оптимальні умови адсорбції можуть бути використані для вдосконалення водоочисних технологій у побутових та промислових системах. Дані дослідження придатні для оптимізації роботи очисних споруд та подальшого впровадження біовугілля у практику водопідготовки.

Апробація результатів та публікації. Основні положення та результати кваліфікаційної роботи викладено у доповіді на тему: «Екологічні аспекти застосування біовугілля для очистки стічних вод» на XVIII Міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених

«Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень» 14-15 травня 2024 року м. Луцьк[3]; «Екологічний аналіз використання біовугілля як сорбента для очистки стічних вод». Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, студентів та аспірантів «Актуальні проблеми розвитку природничих та гуманітарних наук» 14 листопада 2024 року м. Луцьк [2].

Структура роботи. Обсяг роботи становить 53 сторінки друкованого тексту. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 52 найменувань. Робота містить 5 таблиць, 15 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ БІОВУГІЛЛЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

1.1. Визначення поняття «біовугілля» та екологічні переваги використання його для очистки стічних вод

Біовуглець, також знаний як біопаливо, біовугілля або агроугілля, є високовуглецевим дрібнозернистим матеріалом, отриманим шляхом піролізу біомаси рослинного чи тваринного походження. Його виробництво відповідає законодавчим нормам і безпечно для внесення в ґрунт. У процесі термохімічного перетворення біомаси в умовах відсутності кисню утворюється біовугілля. Згідно з Європейським біокарбоновим сертифікатом (ЕВС), біокарбон визначається як багатий на ароматичний вуглець і мінерали гетерогенний матеріал, створений за допомогою піролізу біомаси, застосовуючи стійкі методи та екологічно чисті технології при контрольованих температурних умовах (350–1000°C). У відповідності до стандартів ЕВС, біовуглець не може виготовлятися через гідротермальну карбонізацію чи торрефікацію.

Біовуглецем вважається матеріал, який містить понад 50% вуглецю за сухою вагою. Якщо ж вміст вуглецю менший за 50%, такий матеріал класифікується як пірогенний вуглецевий матеріал (PCM або pyrogenic carbonaceous material) [9]. Згідно з визначенням Міжнародної ініціативи з вуглецевого палива (IBI), біовуглець є твердим продуктом, отриманим унаслідок термохімічного перетворення біомаси у середовищі з обмеженим доступом кисню.

Біовугілля може виступати як самостійний продукт або бути компонентом сумішей, найчастіше використовуваних як кондиціонери

грунту. Воно сприяє раціоналізації використання ресурсів, відновленню та захисту довкілля від забруднення, а також зменшенню викидів парникових газів (ПГ) [6]. На місцевому рівні біовуглець може бути корисним для підвищення родючості ґрунту, покращення умов росту рослин і життєдіяльності ґрунтових організмів.

Після проходження процесу термохімічного перетворення біомаса може використовуватися як джерело енергії, наприклад, у вигляді поновлюваного палива. Проте за таких обставин її не можна віднести до біовуглецю відповідно до зазначених визначень. Слід також зауважити, що біовуглець не є продуктом простого поєднання біомаси з дрібнодисперсною фракцією вугілля

Біовугілля являє собою насичену вуглецем тверду речовину, що утворюється внаслідок термічної обробки біологічної маси у середовищі з обмеженим доступом кисню. Його фізико-хімічні характеристики можуть бути модифіковані задля покращення структурних та електрохімічних властивостей. До таких покращень належать підвищення пористості, збільшення площі поверхні, вдосконалення графітизації, а також функціональні зміни поверхні за допомогою легування гетероатомами. Перелічені принципи модифікації роблять біовугілля перспективним матеріалом для застосування в галузях накопичення водню чи енергетичних технологій, таких як батареї та суперконденсатори.

Особливістю біовугілля є його утворення внаслідок процесу повільного піролізу, в результаті якого отримується матеріал, здатний виступати ефективним носієм для поглинання вуглецю з відновлюваних та сталих джерел біомаси.

1.2. Склад та структура біовугілля

Характеристики біовуглецю різноманітні і залежать від типу біомаси, яка використовується для його виробництва, і середовища, в якому відбувається піроліз. Біовуглець має такі властивості, як стабільність, питома поверхня, пористість і хімічний склад.

Хімічний склад біовуглецю дуже різноманітний і значною мірою залежить від хімічного складу субстратів, способу піролізу та параметрів процесу. Біовуглець складається з трьох компонентів: золи, вуглецю, що вилугується та більш-менш стабільного органічного вуглецю. Альіфатичні сполуки, окислені сполуки вуглецю та ароматичні сполуки, які легко розкладаються, присутні в них [22]. Біовуглець відрізняється від інших видів органічних речовин за хімічним складом завдяки значно більшій кількості ароматичних сполук вуглецю. Крім того, біовуглець є корисним джерелом мінеральних речовин, таких як магній, кальцій і карбонати, для мікроорганізмів у ґрунті завдяки своїй мінеральній фракції, яка складається з макро- та мікроелементів. Завдяки використанню біомаси та умовам термічного процесу біовугілля може містити високий вміст вуглецю від 50 до 90%. Вміст води може становити 1-15%, летких речовин 0-40% і мінеральних речовин 0,5-5%. Співвідношення C/N варіюється від 7 до 500. Показником біовуглецю є нейтральний або лужний рН. Вміст калію та фосфору в біовуглеці суттєво відрізняється. Фосфоровий вміст становить 2,7–480 г/кг, а калійовий вміст становить 1,0–58 г/кг [33]. Оскільки біовуглець не схильний до руйнування та мікробіологічного розкладання, його додавання до ґрунту демонструє значну стабільність хімічного складу. У ґрунті присутні деякі види біокарбону, які можуть розкладатися досить швидко, тоді як інші види можуть залишатися незмінними протягом тривалого часу. Тим не менш, з часом кожен із цих видів біокарбону перетворюється на мінерал у ґрунті. Стабільність біокарбону в навколишньому середовищі залежить від різних факторів, включаючи тип субстрату, який використовується для

виробництва біокарбону, особливості процесу піролізу, властивості ґрунту та кліматичні умови. Пориста структура та питома поверхня біовуглецю є двома основними фізичними властивостями, які контролюють різноманітні процеси, які відбуваються в ґрунті. На процеси сорбції, поглинання води та утримання поживних речовин у ґрунті впливає внутрішня пориста здатність біовуглеця [5]. Фізико-хімічні характеристики біовугілля роблять його придатним для використання в захисті навколишнього середовища, зокрема його основний вміст органічного вуглецю та мінеральних речовин у стабільній формі, висока пористість і питома поверхня.

Біовугілля можна визначити як перероблений вуглець, який не завдає шкоди навколишньому середовищу. Останній є дешевим, твердим вуглецевим матеріалом, отриманим шляхом піролізу відновлюваних джерел, таких як кора, солома, горіховий і рисовий лушпиння, жому цукрової тростини, осади стічних вод та деревна тріска та гранули [23]. Його виготовлення вимагає менших загальних витрат енергії порівняно з використанням активованого вугілля, що призводить до меншого чистого споживання. Його морфологічні та фізико-хімічні характеристики можуть значно відрізнятися залежно від джерела сировини та умов піролітичної обробки [30]. Він також може бути використаний у багатьох сферах завдяки своїй високій пористості та поверхні, багатій на функціональні групи. Рисунок 1.1 представляє схему застосування біовуглецю та його властивостей, які найчастіше використовуються.

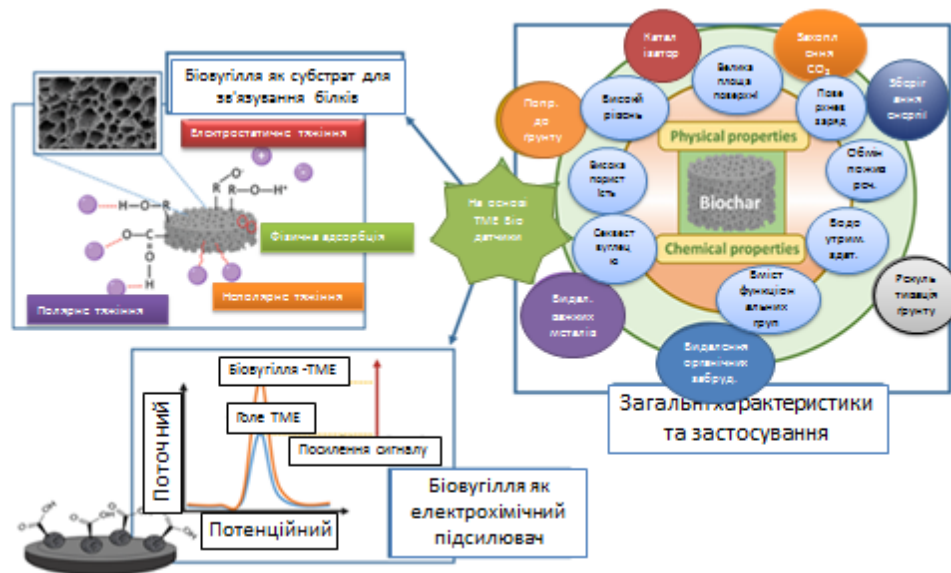


Рис. 1.1. Хімічні та фізичні властивості біовуглецю та його застосування в розробці електрохімічних біосенсорів на основі твердофазового методу екстракції (ТМЕ)*

*Джерело: [7].

1.3. Процеси взаємодії біовугілля зі стічними водами

Використовується біологічне вугілля з великою питомою поверхнею та багатими поверхнево-активними функціональними групами для видалення рідких забруднюючих речовин зі стічних вод, таких як важкі метали, пестициди, органічні важкі метали, пестициди, органічні забруднювачі, азот і фосфор. Різні види біовугілля використовуються для очищення стічних вод і зливових вод (Рис. 1.2). Останнім часом промислові стічні води очищаються за допомогою біопалива, яке адсорбує різні забруднювачі з різних джерел. На адсорбцію забруднюючих речовин біологічним вугіллям впливають три основні фактори. Це кількість біопалива, рН навколишнього середовища та тривалість контакту.

Біопаливо використовується для очищення стічних вод міст. Це можна зробити самостійно або разом з біофільтрами. Цей метод дозволяє відновити

велику кількість азоту та фосфору. Біопаливо з оксидом алюмінію зазвичай використовується для повторного використання або переробки фосфору стічних вод. Біопаливи добре справляються з органічним вуглецем, ХСК, ЗОВ, ЗОВ, ТKN і ТП під час очищення стічних вод міст.

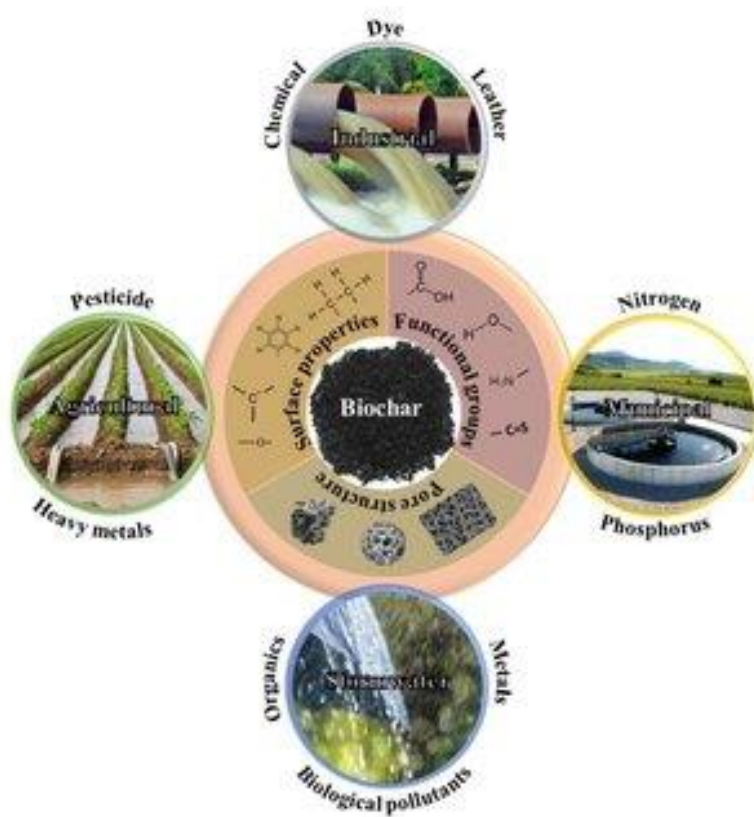


Рис. 1.2. Біологічне вугілля для очищення різних стічних вод*

*Джерело:[41].

Стічні води сільського господарства очищуються за допомогою біовугілля та інших модифікованих форм. Біовугілля особливо використовується для видалення поширених пестицидів зі стічних вод сільського господарства. Біовугілля, отримане шляхом піролізу рисового лушпиння з попередньою кислотною обробкою, показало високу адсорбцію поширених пестицидів. Адсорбційна здатність біовугілля в першу чергу залежить від його об'єму пор і рН. Середовища фільтрації, збагачені біологічним вугіллям, ефективно видаляють мідь і цинк зі зливових стоків. Незважаючи на це, середовища з біологічним вугіллям повинні бути

розроблені та тестовані таким чином, щоб вони забезпечували очікувану продуктивність очищення зливових вод. Видалення загального органічного вуглецю, загального азоту та загального фосфору в системі може покращитися за допомогою біофільтрів, збагачених біологічним вугіллям. Здатність зливових вод видаляти забруднення залежить від характеристик біовугілля, забруднюючих речовин біомаси та хімічного складу [16].

Використовуючи біологічне вугілля як підтримуюче середовище для очищення побутових стічних вод, забруднювачі видаляються за допомогою різноманітних фізичних, хімічних і біологічних процесів. Тим не менш, багато факторів впливають на домінуючий механізм видалення. Фізико-хімічні властивості біомаси, розташування системи та умови експлуатації є частиною цих елементів. Ці процеси включають адсорбцію, біодеградацію, іонний обмін і заповнення/захоплення пор[8].

Адсорбція

Гетерогенність поверхні адсорбенту та тип забруднювача або адсорбату визначають мету адсорбції біопалива. Адсорбція біопалива на поверхні сприяє факторам, таким як Ван-дер-ваальсові сили та водневі зв'язки з функціональними групами, фільтрація, електростатична взаємодія, іонного обмін і утворення поверхневого комплексу. Коли необхідно видалити органічне забруднення, процес адсорбції полегшується такими факторами, як електростатичне притягання, гідрофобна сорбція, водневий зв'язок, π - π електронно-донорно-акцепторні взаємодії та заповнення пор. Неорганічні забруднювачі, такі як важкі метали, адсорбуються за допомогою електростатичного притягання, іонного обміну, комплексоутворення та співосадження. У процесі комплексоутворення та співосадження метали, присутні в побутових стічних водах, утворюють комплекси з оксидними мінералами або вільними карбоксильними та гідроксильними функціональними групами, які доступні на поверхні біомаси. Після цього ці комплекси або фізично осідають, або утворюють шари, що покривають поверхню біомаси. Фармацевтичні продукти та засоби особистої гігієни є

новими забруднювачами, які зазвичай адсорбуються біологічним вугіллям за допомогою електростатичного притягання, гідрофобних ефектів, водневого зв'язку, ароматичного р-донорного і катіонного р-акцепторного спряження та заповнення пор [19].

Завдяки заповнюванню пор забруднення видаляється зі стічних вод. Зазвичай мережа пор складається з мезопор довжиною від 2 до 50 нм, макропор довжиною більше 50 нм і мікропор довжиною менше 2 нм. Малі мезопори та мікропори розміром 2–20 нм керують поверхневим біопаливом і впливають на його поглинання органічних сполук [28]. Загальний об'єм мезопор і мікропор, розташованих на поверхні пор біовугілля, дозволяє використовувати заповнення пор для видалення органічних забруднень у побутових стічних водах [16]. Механізм витіснення поп залежить від природи, виду біопалива та полярності органічного забруднювача. Для видалення органічних забруднень зі стічних вод використовували біомасу дуба, гамма-трави та сосни звичайної. Було виявлено, що висока спорідненість біовугілля до катехолу була зумовлена заповненням мікропор.

Біодеградація

Взаємодія між властивостями біопалива та метаболізмом мікробних організмів, прикріплених до поверхні біомаси, відіграє важливу роль у видаленні забруднюючих речовин [24]. Завдяки великій площі поверхні та унікальній структурі пор він може підтримувати різноманітні мікробні спільноти [38,12]. Для росту мікробів на біопаливі також важливі рН біовугілля та структура розчиненого кисневого вуглецю. Під час очищення побутових стічних вод біопаливо може мати різні наслідки на склад, активність і різноманітність мікроорганізмів. Дослідили, як використання фільтрів з кори, деревного вугілля та піску впливає на мікробне різноманіття та потенційне дихання під час очищення стічних вод. Дослідження стверджують, що вугільні фільтри сприяють розвитку різноманітних мікробних спільнот. Коли мова заходить про бактеріальний склад бактеріальної спільноти, 33%, 25%, 13% і 11% були визначені як g-

protobacteria, a-protobacteria, b-protobacteria та clostridia відповідно. Оскільки вони будуть більш дрібними, ніж піщані фільтри в системах очищення стічних вод, вугільні та коряві фільтри повинні бути готові, оскільки швидка мінералізація легкорозкладних речовин у верхніх шарах і більше кисню в нижніх шарах створюють негативну кореляцію між потенційним диханням і глибиною. У створених водно-болотних угіддях використання біологічного вугілля як субстрату підтримує низку важливих мікробів, включаючи бактерії, які нітрифікують і денітрифікують. Це пояснюється великою питомою поверхнею та кількома порами біологічного вугілля, що полегшує уловлювання органічних речовин. Органічні речовини, які сприяють розмноженню та метаболізму мікроорганізмів, легко уловлюються [26,34,18]. Інші дослідники також виявили, що внесення біомаси в створені водно-болотні угіддя підвищує функціональність мікроорганізмів через деградацію органічної речовини та видалення азоту. Можна збільшити кількість груп мікроорганізмів за допомогою додавання біомаси. Це призводить до підвищення мікробної активності та спрощення процесу видалення токсичних речовин [38]. Загальний ефект внесення біомаси полягає в тому, що воно регулює мікробну активність, що призводить до кращого видалення забруднюючих речовин.

Іонний обмін

Іонний обмін — це реакція, яка відбувається між іонами в рідкій фазі та іонами в твердій фазі. Іонообмінний матеріал адсорбує іони в рідкій фазі під час процесу іонного обміну. У результаті іонообмінник вивільняє еквівалентні іони назад у розчин, щоб забезпечити електричну нейтральність водного розчину. Основним методом використання біовугілля для видалення важких металів зі стічних вод є іонний обмін. Піроліз зазвичай залежить від температури, оскільки температури понад 350°C знижують здатність біомаси іонообмінювати. Більша іонообмінна обмінна ємність сприяє кращій адсорбції металів у багатьох дослідженнях [15, 21]. Іонний обмін є основним методом видалення металів з побутових стічних вод, але ПХДЗ не можна

легко видалити за допомогою його використання. Це пов'язано з їхньою нездатністю легко перетворюватися на іонні форми.

Синергетичне видалення забруднювачів з побутових стічних вод на місці

Синергетичне видалення ПХДЗ, органічних речовин і поживних речовин зі стічних вод за допомогою біовугільних фільтрів вимагає поєднання процесів адсорбції та біодеградації. Біовугільні фільтри можуть стати самодостатніми за допомогою біологічної регенерації, коли адсорбція та біодеградація використовуються разом.

Мікроби (природні у воді або введені ззовні відповідно до цільових забруднень) можуть бути іммобілізовані на поверхні пористого вуглецю, утворюючи біоплівки. Під час процесу біолізації ці біоплівки потім метаболізуються та розкладаються адсорбовані забруднювачі. Закупорені пори біовугілля можна звільнити за допомогою процесу біорегенерації. Це підвищує здатність біовугілля до адсорбції, що підвищує термін служби матеріалу. Залишки азоту на поверхні вугільних фільтрів можуть прискорити процес біодеградації. Дослідження показало, що додавання мікроелементів (Zn) і макроелементів (N, P) покращує біологічне очищення, що означає збільшення хімічного очищення та поглинання кисню. На рисунку 1.3 показано кілька способів використання біомаси для видалення забруднювачів з побутових стічних вод[12].

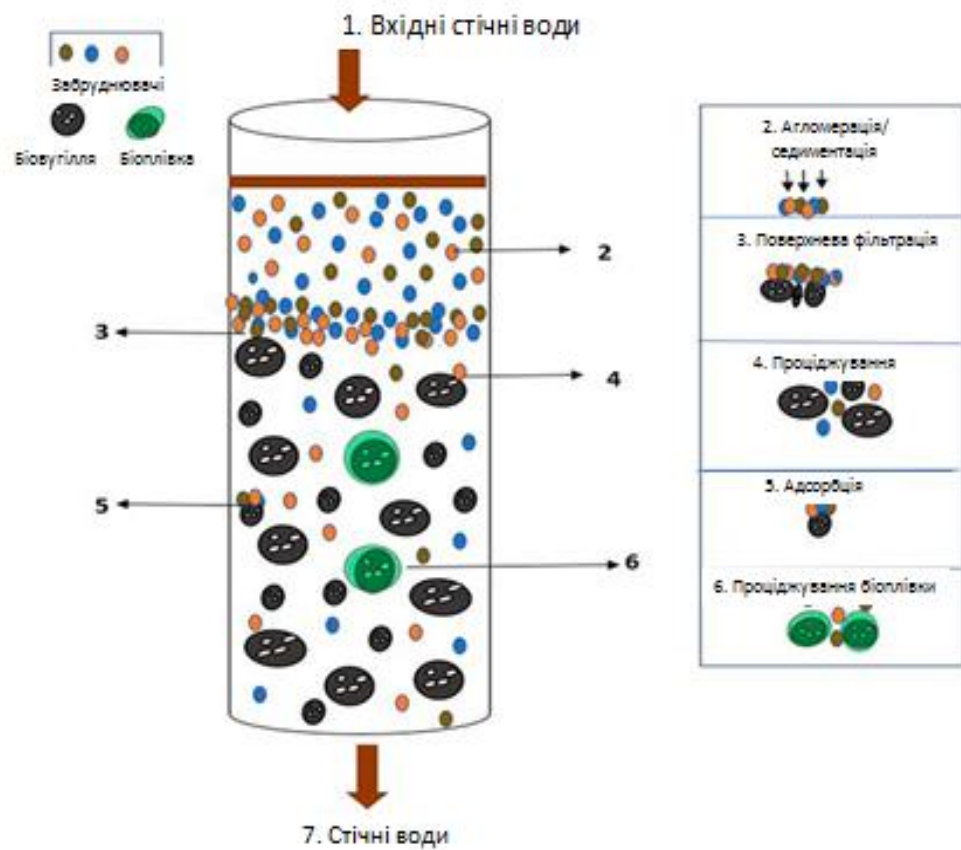


Рис.1.3. Різні механізми, за допомогою яких забруднювачі видаляються з побутових стічних вод на місці за допомогою біомаси*

*Джерело:[10].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Методи очищення стічних вод

Очищення стічних вод може допомогти відновити використану або забруднену воду [14]. Численні галузі виробляють різноманітні забруднювачі, що робить очищення стічних вод все складніше. Сюди входить вода, яка використовувалася для побутових, комерційних, промислових або сільськогосподарських цілей. Щоб задовольнити вимоги щодо повторного використання води, очищення промислових стічних вод вимагає постійного використання різноманітних очисних заходів [11]. Для очищення промислових стічних вод зазвичай використовується поєднання фізичних, біологічних і хімічних методів, іноді в певному порядку, оскільки ці методи максимізують видалення різних забруднювачів, особливо органічних і неорганічних [27]. Фізична обробка зазвичай використовує низку різних технологій, щоб досягти ідеального очищення та утилізації відходів. У нафтохімічних, сталеливарних і енергетичних секторах мембранна технологія є провідною технологією розділення для очищення стічних вод. Очищення промислових стічних вод, що застосовуються для відділення забруднених речовин у потоці, можна досягти за допомогою мембранних технологій, таких як зворотний осмос, ультрафільтрація та мембранні біореактори [31]. Біологічне очищення, яке використовує мікроорганізми для очищення стічних вод, є ефективним методом очищення стічних вод і дозволяє знизити рівень хлору в стічних водах [37]. Це також було використано останнім часом для очищення стічних вод нафтопереробних заводів [20]. Наприклад, анаеробне очищення використовує мікроорганізми для очищення стічних вод на початкових стадіях за відсутності кисню, що зменшує виробництво біомаси [2].

Тим не менш, обмеженням процесу очищення є те, що органічна речовина розкладається лише частково через обмежений рівень гідролізу та через нестабільну продуктивність потребує постійного контролю [4]. Таким чином, органічне очищення зазвичай поєднується з аеробним очищенням для дотримання стандартів очищення стічних вод [25]. Хімічне очищення використовує хімічні речовини, які реагують з різними хімічними речовинами та небажаними важкими металами. Осадження, нейтралізація, адсорбція, дезінфекція (включаючи хлор, озон і ультрафіолетові промені) та іонний обмін є найпоширенішими методами хімічного очищення [39]. У процесі хімічного осадження до забруднювачів, таких як фосфор, важкі метали, завислі речовини та БСК, додаються хімічні речовини. Адсорбція є найбільш ефективним методом усунення важких металів зі стічних вод, як це добре відомо [12]. Дезінфекція, також відома як поглиблене окислення, є процесом, під час якого сильні окислювачі, такі як УФ-промені, озон, сполуки хлору та перекис водню, застосовуються для дезінфекції та дезактивації бактерій. Для видалення хімічних речовин, важких металів, органічних і неорганічних забруднювачів і хімічних речовин використовуються різні методи очищення промислових стічних вод, незалежно від того, чи очищуються вони на місці установки чи ні [13].

2.2. Матеріали та методики лабораторних досліджень

В дослідженні було використано такі матеріали :

Біовугілля — це вуглецево-негативний засіб для зміни ґрунту на основі деревного вугілля. Його можна використовувати для рекультивації та покращення маргінальних ґрунтів, підвищуючи їхню водоутримуючу здатність і підвищуючи їхню родючість. Крім того, під час виробництва він створює корисні побічні продукти відновлюваної енергії. [1].



Рис. 2.1. Біовугілля, яке використовувалося у дослідженні*

*Джерело: розроблено автором.

Малахітовий зелений - це барвник з групи сполук триарилметану. Це хімічна сполука з характерним зеленим кольором.

Малахітовий зелений можна використовувати для нейтралізації певних хімічних забруднювачів за допомогою процесів окислення або зв'язування забруднювачів, що призводить до зменшення їхньої токсичності або мобільності в навколишньому середовищі.



Рис. 2.2. На рисунку зображено малахітовий зелений, який використовувався у дослідженні*

*Джерело:[<http://uk.yanhuidye.com/malachite-green-100-with-green-shining-crystal-2-product/>].

Дослідження впливу початкової концентрації на ефективність видалення забруднення

До 5 колб ємністю 250 мл, що містили по 0,1 г біовуглецю, додавали по 20 мл попередньо приготованих водних розчинів (0,0251 г барвника вносили в колбу ємністю 250 мл, заповнювали до мітки дистильованою водою і добре перемішували. Потім автоматичною піпеткою відбирали 10 макрограм і переносили в колби на 100 мг) з концентраціями від 5 мг/дм³ до 100 мг/дм³. Зразки струшували протягом 120 хв, фільтрували на наступному етапі і отримували за допомогою адсорбційної атомної спектроскопії (UNICAM Solaar 939.).

Вплив дози біовуглецю

Основна мета експерименту полягала у визначенні впливу окремих доз біовуглецю на ефективність видалення забруднювачів з водних розчинів. 20 см³ модельного водного розчину було додано до 5 реакторів об'ємом 100 мл, що містили різні дози біовуглецю (0,01-0,5 г). Зразки струшували протягом 120 хв, потім фільтрували і маркували за допомогою адсорбційної спектрометрії (UNICAM Solaar 939)

Вплив рН водного розчину

Головною ціллю експерименту було визначення впливу концентрації на ефективність видалення забруднювача з водних розчинів. 20 см³ модельного водного розчину (рН в діапазоні 4-8) додавали в 3 реактори об'ємом 100 мл, що містили 0,1 г біовуглецю. Зразки струшували протягом 120 хв і фільтрували. Адсорбцію отримували за допомогою атомної спектроскопії (UNICAM Solaar 939).

Вплив часу контакту

Передбачувана мета експерименту полягала у визначенні впливу часу контакту на ефективність видалення забруднювача з водного розчину. До реакторів ємністю 250 мл, що містили 0,1 г біовуглецю, додавали 200 мл модельного водного розчину з концентрацією 20 мг/дм³. Ці зразки струшували протягом певного часу (0-120 хв), потім фільтрували, а фільтрат визначали методом адсорбційної атомної спектрометрії (UNICAM Solaar 939).

2.3 Методи аналізу та обробки експериментальних даних

Для кількісної оцінки ефективності використання біовугілля як сорбенту для очищення стічних вод та визначення ключових характеристик сорбційного процесу, було застосовано ряд аналітичних та розрахункових методів.

Методи визначення залишкової концентрації

Для визначення залишкової концентрації цільового забруднювача барвника Малахітовий зелений у розчинах після сорбційного експерименту використовувався метод спектрофотометрії[17].

Принцип методу ґрунтується на законі Бугера–Ламберта–Бера, згідно з яким інтенсивність поглинання світла розчином прямо пропорційна концентрації речовини, що поглинає.

- Обладнання: Вимірювання оптичної густини розчинів проводилися на спектрофотометрі UNICAM Solaar 939.
- Калібрувальна крива: Побудова калібрувальної кривої здійснювалася шляхом вимірювання оптичної густини серії стандартних розчинів із відомою концентрацією. Вимірювання проводилися при максимальній довжині хвилі поглинання, характерній для досліджуваного забруднювача[34, 21].

- Аналіз зразків: Після досягнення рівноваги в експериментальних сумішах, розчини відокремлювали від сорбенту фільтрування і вимірювали їхню оптичну густину. Рівноважна концентрація визначалася за допомогою отриманої калібрувальної кривої[18].

Таблиця 2.1.

Перелік аналітичних методів та обладнання*

Досліджуваний параметр	Метод аналізу	Використане обладнання	Призначення
Залишкова концентрація	Спектрофотометрія	Спектрофотометр	Визначення концентрації органічного забруднювача (барвника) у розчині.
рН середовища	Потенціометрія	рН-метр	Контроль та фіксація кислотності/лужності розчинів під час експерименту.
Маса сорбенту	Гравіметрія	Аналітичні ваги	Точне зважування біовугілля та хімічних реагентів.
Контакт фаз	Перемішування	Магнітна мішалка з підігрівом	Забезпечення рівномірного контакту рідкої та твердої фаз.
Обробка та	Статистичний	Персональний	Лінеаризація

моделювання даних	аналіз	комп'ютер; Програмне забезпечення: MS Excel	ізотерм, кінетичний аналіз, розрахунок.
------------------------------	--------	--	---

*Джерело: розроблено автором.

Аналіз механізмів сорбції

Для поглибленого вивчення фізико-хімічних закономірностей сорбції дані були проаналізовані за допомогою моделей сорбційних ізотерм та кінетики.

1. Сорбційні ізотерми: Використовувалися моделі Ленгмюра та Фройндліха для опису рівноважних даних. Лінеаризація експериментальних даних і розрахунок відповідних констант дозволили визначити тип сорбції, максимальну ємність та інтенсивність адсорбції.
2. Кінетичні моделі: Для оцінки швидкості сорбції та визначення механізму, що контролює процес, застосовувалися моделі псевдо-першого порядку та псевдо-другого порядку[36].

РОЗДІЛ 3

ЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ БІОВУГІЛЛЯ НА ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

3.1. Характеристика результатів етапів дослідження впливу біовугілля на очистку стічних вод

Для першого експерименту було відібрано 5 проб з різною концентрацією розчину з барвником; для другого експерименту виготовлено 5 розчинів із різною концентрацією біовугілля; для третього— зроблено 3 розчини із різним показником РН; для четвертого етапу експерименту, де визначали вплив часу на контакт з біовугіллям, було відібрано 8 проб. Всі приготовані розчини проходили перемішування в шейкер-інкубаторі (рис. 3.1) та аналізувались на вміст барвника на спектрофотометрі UNICAM Schar 237 (рис. 3.2). Наважки біовугілля зроблені на аналітичних вагах (рис. 3.3).



Рис.3.1. Шейкер-інкубатор 4800-10 contro*

*Джерело: розроблено автором.

Шейкер-інкубатор — це лабораторний пристрій, який виконує одночасно функції шейкера та інкубатора. Він використовується для забезпечення ідеальних умов для росту клітин або мікроорганізмів і підтримки рівномірного змішування середовища протягом інкубації.



Рис. 3.2. UNICAM Schar 237 Спектрофотометр*

*Джерело: розроблено автором.

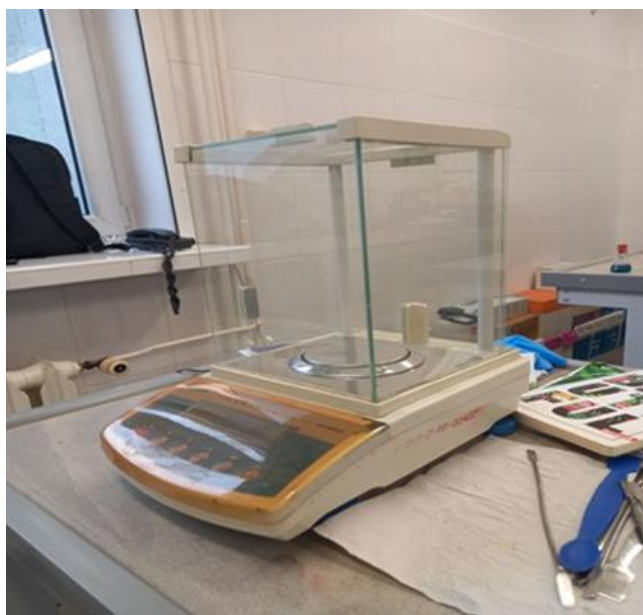


Рис. 3.3. Аналітичні ваги Sartorius CP2245*

*Джерело: розроблено автором.

1. Вплив початкової концентрації на ефективність видалення забруднення

Таблиця 3.1.

Експериментальні данні дослідження впливу початкової концентрації.

Abs	c	% видалення	q _e
0,79	4,30049	90,10101	1,295591
2,44	13,28253	47,63948	2,416984
6,87	37,39793	24,50549	2,427872
11,6	63,14643	17,02432	2,591181
16,94	92,21557	12,86008	2,721829

*Джерело: розроблено автором.

Де,

- Abs – значення спектрофотометрії;
- $c = \frac{Abs}{0.1837}$;
- %видалення $-\left(\frac{c_0-c}{c_0}\right) * 100\%$;
- c₀ - концентрація розчину (10, 25, 50, 75, 100 мг/л);
- $q_e = \frac{(c_0-c)}{0,1} * 0,02$

Ефективність ступеня видалення забруднення в залежності від їх початкової концентрації в розчині з застосуванням біовугілля зазначено на рис.3.4.

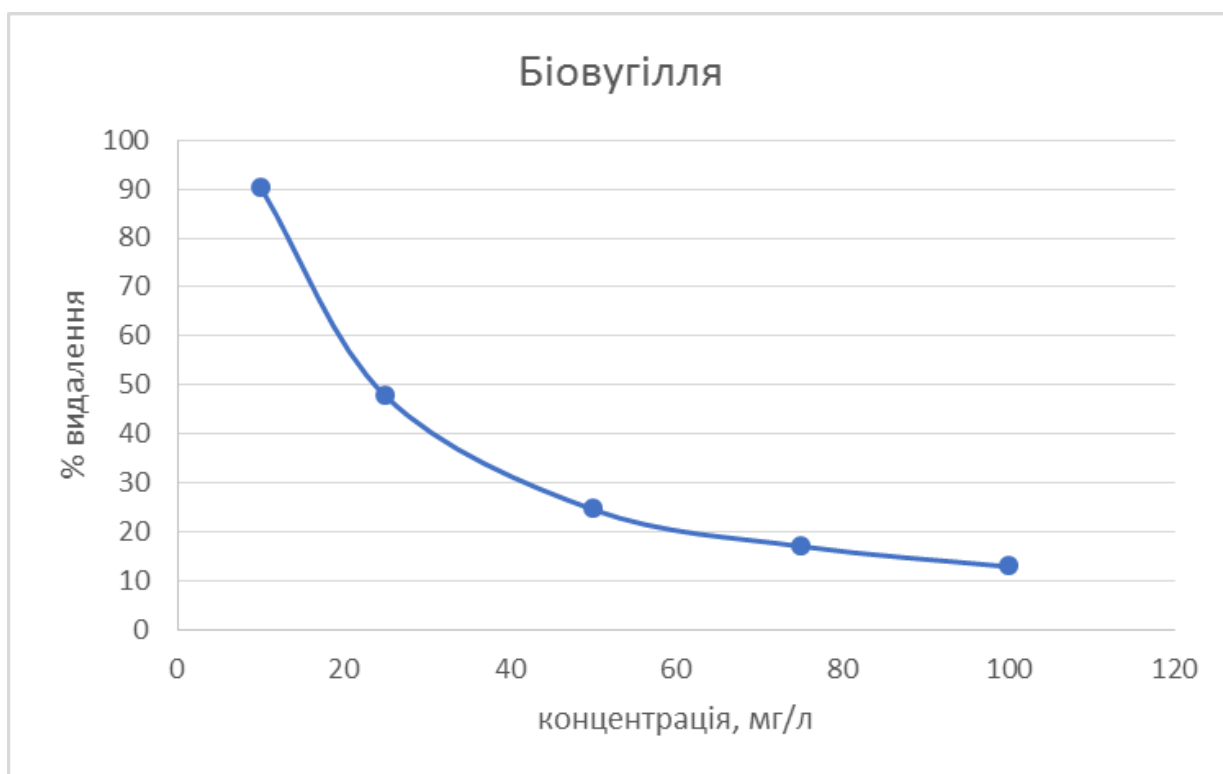


Рис.3.4. Вплив початкової концентрації забруднення на ефективність видалення забруднення*

*Джерело: розроблено автором.

На основі результатів дослідження можемо констатувати: що при зменшенні концентрації забруднення ефективність видалення цього забрудненн із застосуванням біовугілля покращується.



Рис. 3.5. Колби після перемішування у шейкер-інкубаторі*

*Джерело: розроблено автором.

2. Вплив дози біовугілля на ефективність видалення забруднення

Таблиця 3.2.

Експериментальні данні дослідження впливу ефективності видалення забруднення дози біовуглецю.

Abs	c	% видалення	q _e
4,99	27,16385	0	0
4,29	23,35329	24,50549	52,36799
2,49	13,55471	52,85714	28,78606
1,29	7,022319	72,63736	17,00599
0,62	3,375068	90,8	4,616222
0,72	3,919434	92,08791	1,824714

*Джерело: розроблено автором.

Де,

- Abs – значення спектрофотометрії;
- $c = \frac{Abs}{0.1837}$;
- %видалення – $\left(\frac{c_0 - c}{c_0}\right) * 100\%$;
- c₀ - концентрація розчину (50 мг/л);
- $q_e = \frac{(c_0 - c)}{0.1} * 0.02$

Доза сорбенту є одним з ключових параметрів, що визначають ступінь вилучення важких металів з водного розчину в процесі сорбції. Маса

окремих важких металів, вилучених з водних розчинів, знаходиться в тісному взаємозв'язку з обмінною ємністю і, отже, з дозуванням адсорбенту.

Збільшення дозування сорбенту забезпечує кращу поверхню контакту, а також більшу питому поверхню.

Ефективність ступеня видалення забруднення з водного розчину в залежності від дози біовугілля зображено на рис. 3.6.

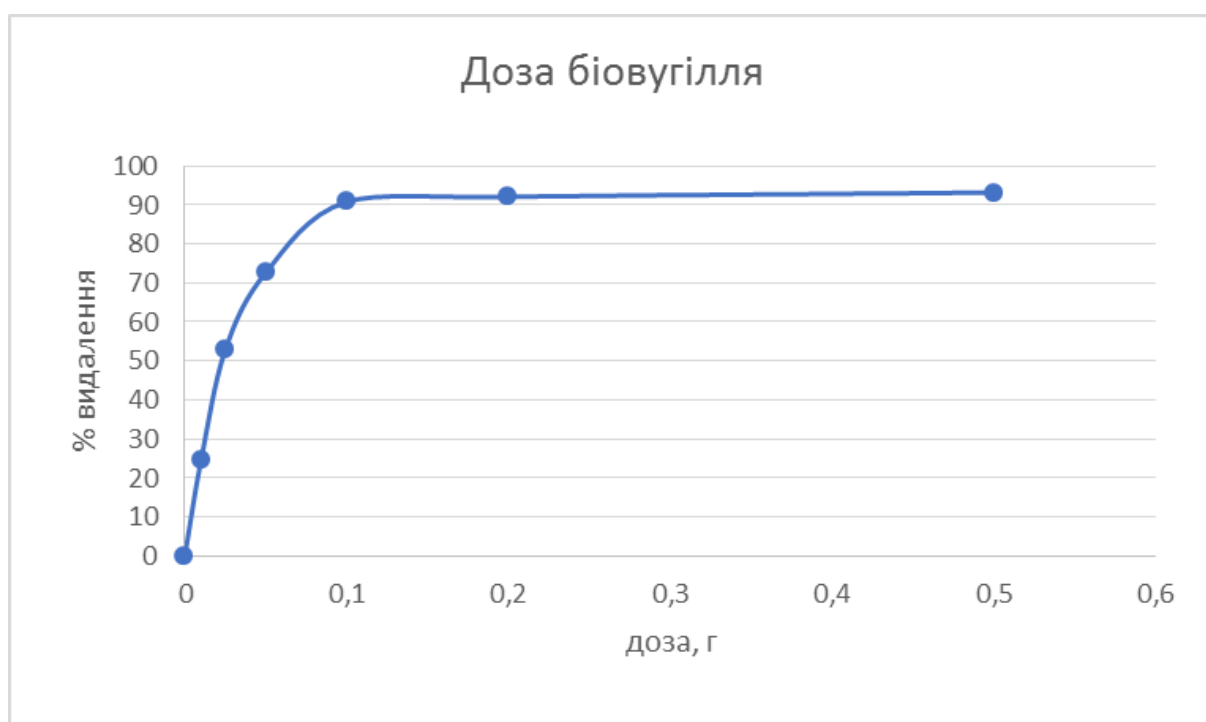


Рис.3.6.Ефективність ступеня видалення забруднення з водного розчину в залежності від дози біовугілля*

*Джерело: розроблено автором.

Результати дослідження дають змогу припустити, що коли доза біовугілля збільшується, ефективність очищення водного розчину збільшується. Збільшення дози сорбенту не призвело до зменшення кількості забруднення в розчині. Ефективність видалення забруднення була найвищою в 0,2 г компосту (89%, 91%, 93% і 92% відповідно).



Рис. 3.7. Фільтрування розчинів через шприцевий фільтр*

*Джерело: розроблено автором.

3. Ефективність вилучення забруднення залежно від значення рН водного розчину

Таблиця 3.3.

Експериментальні данні дослідження впливу рН*

Abs	c	%видалення	q _e
1,52	8,27436	0	0
1,34	7,294502	41,03947	0,195972
0,6	3,266195	91,77632	1,001633
0,59	3,211758	91,35526	1,01252

*Джерело: розроблено автором.

Де,

- Abs – значення спектрофотометрії;

- $c = \frac{Abs}{0.1837}$;

- %видалення – $\left(\frac{c_0 - c}{c_0}\right) * 100\%$;
- c_0 - концентрація розчину (10 мг/л);
- $q_e - \frac{(c_0 - c)}{0,1} * 0,02$

Ефективність вилучення забруднення залежно від значення рН водного розчину показано на рис.3.8.

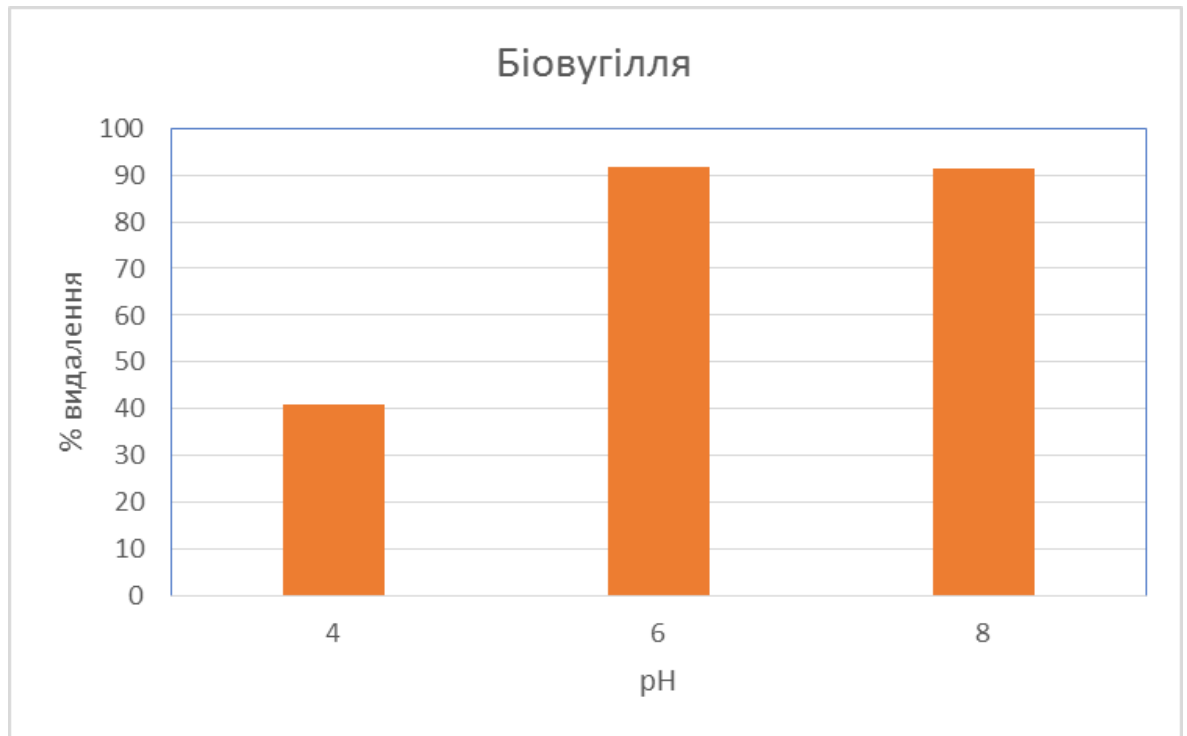


Рис.3.8.Ефективність вилучення забруднення залежно від значення рН водного розчину*

*Джерело: розроблено автором.



Рис. 3.9. Видалення непотрібних бактерій ультразвуком*

*Джерело: розроблено автором.

З наведеного рисунка видно, що в діапазоні рН-2-8 відбувається вилучення забруднення з модельного водного розчину за допомогою біовугілля. Спостерігається поступове зростання ефективності вилучення забруднення яка за рН 6 та 8 досягала свого максимального значення.

4. Ефективність ступеня видалення забруднення в залежності від часу контакту.

Таблиця 3.4.

Експериментальні данні дослідження впливу часу контакту на ефективність видалення забруднення*

Abs	c	% видалення	q _e
2,15	11,70386	0	0
0,92	5,008165	57,2093	1,33914
0,92	5,008165	62,2093	1,33914
0,93	5,062602	66,74419	1,328253
0,91	4,953729	72,67449	1,350027
0,88	4,790419	79,06977	1,382689

1,14	6,20577	90,97674	1,099619
0,85	4,627109	90,96517	1,415351
0,82	4,4638	91,06047	1,448013

*Джерело: розроблено автором.

Де,

- Abs – значення спектрофотометрії;
- $c = \frac{Abs}{0.1837}$;
- %видалення – $\left(\frac{c_0 - c}{c_0}\right) * 100\%$;
- c_0 - концентрація розчину (10 мг/л);
- $q_e = \frac{(c_0 - c)}{0.1} * 0.02$

Ефективність ступеня видалення забруднення в залежності від часу контакту показано на рис. 3.10.

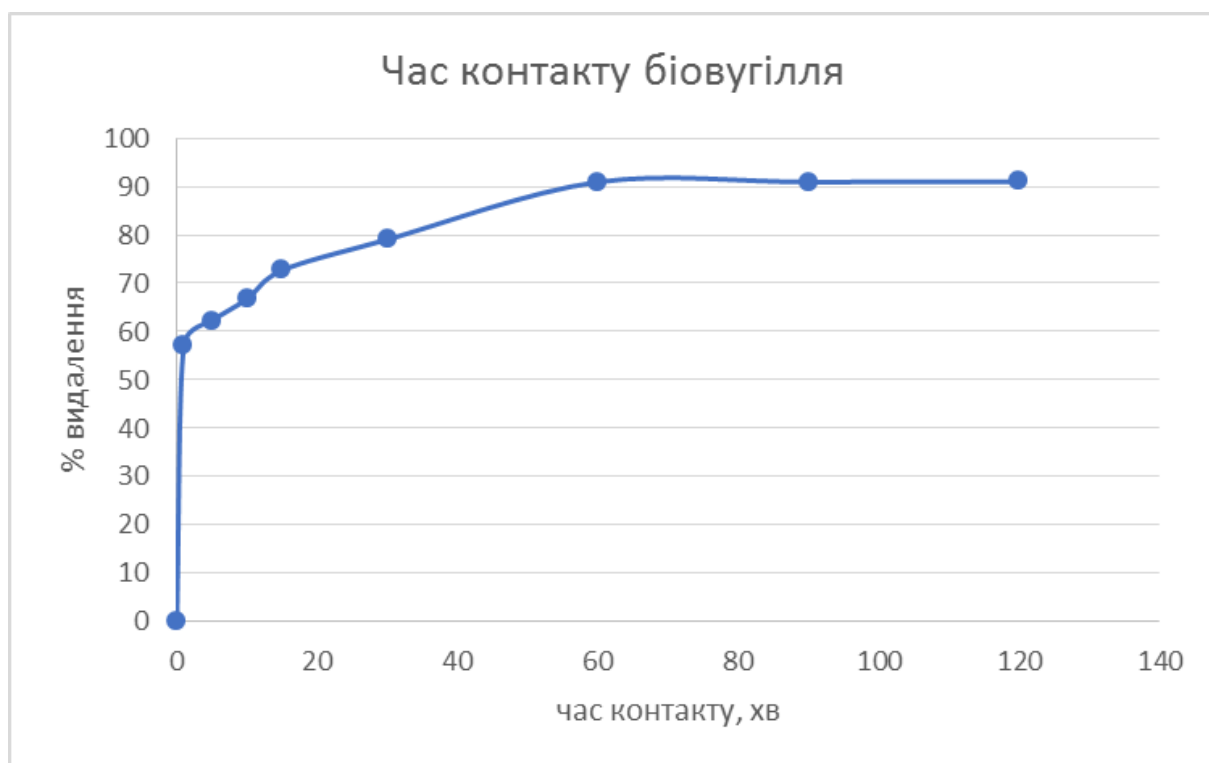


Рис. 3.10.Ефективність ступеня видалення забруднення в залежності від часу контакту*

*Джерело: розроблено автором.

Ефекти дослідження показали, що з часом контакту ефективність видалення забруднювача малахітового зеленого збільшувалася, поки в цьому випадку не встановився стан адсорбційної рівноваги (60–120 хв).

3.2 Екологічні перспективи використання біовугілля для очищення стічних вод

Використання біовугілля для очищення стічних вод має кілька значних екологічних переваг, що підтверджується проведеними дослідженнями. Основні екологічні переваги включають:

1. Адсорбція забруднювачів:

- Біовугілля ефективно адсорбує широкий спектр забруднювачів, включаючи важкі метали (таких як кадмій, свинець, ртуть), органічні забруднювачі, пестициди та фармацевтичні залишки. Це знижує концентрацію цих шкідливих речовин у водних системах.

2. Покращення якості води:

- Використання біовугілля сприяє покращенню загальної якості води, знижуючи її мутність, кольоровість та запах. Це робить воду безпечнішою для використання як у побутових, так і в промислових цілях.

3. Зменшення біохімічного споживання кисню (БСК):

- Біовугілля допомагає зменшити БСК у стічних водах, що вказує на зниження рівня органічних забруднювачів. Це важливо для підтримки здоров'я водних екосистем, оскільки високий рівень БСК може призвести до зменшення концентрації розчиненого кисню у воді, що негативно впливає на водну фауну[45].

4. Затримка та деградація поживних речовин:

- Біовугілля може утримувати і допомагати в деградації надлишкових поживних речовин, таких як азот та фосфор, які часто присутні у стічних

водах. Це допомагає запобігти евтрофікації водойм, що є проблемою, викликаною надмірним ростом водоростей.

5. Біосорбція мікрозабруднювачів:

- Біовугілля забезпечує середовище для розвитку мікроорганізмів, які можуть розкласти органічні забруднювачі. Така біосорбція сприяє додатковому очищенню стічних вод, забезпечуючи більш ефективне видалення забруднювачів.

6. Відновлення та повторне використання:

- Біовугілля можна відновлювати та повторно використовувати, що робить його економічно вигідним і знижує потребу у виробництві нових сорбентів. Це також зменшує кількість відходів, що утворюються в процесі очищення води[40].

7. Екологічна безпека:

- Біовугілля є нетоксичним та біологічно розкладається, що робить його екологічно безпечним матеріалом для використання в системах очищення води.

Наукові дослідження підкреслюють ефективність біовугілля в системах очищення стічних вод та його екологічні переваги. Наприклад, дослідження демонструє, що біовугілля може знизити концентрацію важких металів у стічних водах до 90% і більше, залежно від типу біовугілля та умов очищення [42].

Застосування біологічного вугілля може мати низку недоліків, які можуть мати негативний вплив на навколишнє середовище. Стабільність при використанні біовугілля в навколишньому середовищі є одним з найважливіших факторів, які слід враховувати. Біопалива переважно вуглецеві. Термін «стабільність біопалива» стосується стійкості вуглецевої структури в цілому. Ароматичність і ступінь ароматичної конденсації біопалива є двома показниками, які можуть вказувати на структуру вуглецю. Оскільки фізико-хімічні характеристики різних біопалив відрізняються, слід враховувати їх стабільність. Зважаючи на нестабільність біомаси, [35]

виявили можливість розчинення органічної речовини з біомаси в комплексонах важких металів. Це означає, що розчинена органічна речовина з біомаси може бути знайдена в розчині. Крім того, розчинена органічна речовина може мати високий питомий опір, аромат і стабільність. Використання біовугілля для очищення води та стічних вод може призвести до вивільнення вуглецю з біовугілля, що збільшує вміст вуглецю у водоймі. Крім того, важкі метали містяться в біовугіллі, особливо отриманому з мулу, які можуть вимиватися під час очищення води та стічних вод, що призводить до забруднення важкими металами. Стабільність каталізатора погіршується після використання біологічного вугілля. Структурна деградація деревного вугілля може бути одним із факторів, які сприяють зниженню стабільності каталізатора. Отже, стабільність біологічного вугілля також пов'язана з якістю води та стічних вод. Отже, стабільність біологічного вугілля має значний вплив на його придатність до екології. Таким чином, щоб визначити стабільність біомаси в майбутньому, необхідно провести додаткові дослідження. Дослідження зв'язку між стабільністю біомаси та умовами піролізу є важливим, оскільки умови піролізу можуть змінювати структуру та вміст вуглецю. Незважаючи на стабільність, слід враховувати потенційну токсичність біопалива для мікроорганізмів. Як стверджують [10], біовугілля підвищує ферментативну здатність ґрунтових мікроорганізмів у низьких дозах, що свідчить про те, що навіть у низьких дозах біовугілля не має токсичного впливу на бактерії [32]. Виявили, що модифіковане Fe_3O_4 біопаливо з бамбука має низький потенціал цитотоксичності. З іншого боку, високі дози біопалива, отриманого зі стебла тютюну, мали цитотоксичний і генотоксичний вплив на епітеліальні клітини через те, що воно сприяло виробленню АФК. Як було зазначено раніше, біовугілля має широкий спектр фізичних та хімічних властивостей. Для того, щоб біопаливо могло бути корисним для навколишнього середовища, необхідні додаткові дослідження. Токсичність можна випробувати за допомогою риби, водоростей, водяних білх і бактерій, що світяться [48].

Важка хімія, поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), діоксини, екологічно стійкі вільні радикали, перфторорганічні речовини і леткі органічні сполуки (ЛОС) можуть внести різні види біомаси в ґрунт, що може призвести до токсичного середовища [29,17]. Важка токсичність, стійкість і біоаккумуляція цих забруднювачів мають багато негативних наслідків для здоров'я людини. Концентрація та біодоступність важких металів у біомасі залежать від типу біомаси, і більш високий вміст означає більший ризик забруднення навколишнього середовища. Микантус, енергетична культура, росте на ґрунтах, які удобрені осадом стічних вод або стічними водами. Він має високий рівень накопичення мікроелементів. За даними, міскантусове вугілля містить більше небезпечних металів, ніж інші види деревного вугілля, що може призвести до вивільнення важких металів у навколишнє середовище. Крім того, існує високий вміст цинку (Zn) і марганцю (Mn) у вигляді одновалентних і двовалентних катіонів у деревному біопаливі, виготовленому з тріски дуба, бамбука або сосни. Навіть у м'яких умовах, таких як зрошення, ці важкі метали легко вивільняються, оскільки вони погано зв'язані з матрицею біомаси. Це може призвести до більшої біодоступності важких металів, оскільки біопаливо з деревини має велику площу поверхні (180–270 м²/г), а обмінна/кислоторозчинна фракція часто містить більше 50% від загального вмісту металів. Згідно з ретельними дослідженнями та спостереженнями, додавання біологічного вугілля в ґрунт має значний негативний вплив на навколишнє середовище. Тип деревного вугілля визначає ступінь впливу. Використання біопалива може спричинити забруднення повітря та викиди парникових газів, а також мати негативний вплив на здоров'я через вплив, який воно має на атмосферу. Коли біологічне вугілля використовується переважно у великих масштабах, вітрові та тверді частинки також можуть забруднювати повітря [41].

3.3. Оцінка ефективності застосування біовугілля та можливі екологічні ризики

Оцінка ефективності використання біовугілля як сорбційного матеріалу для очищення стічних вод є ключовим етапом визначення придатності цього матеріалу до практичного впровадження у технології водоочистки. Отримані експериментальні результати дали змогу здійснити комплексний аналіз адсорбційних характеристик біовугілля, визначити його експлуатаційні можливості, межі ефективності та потенційні ризики, пов'язані з використанням у природно-технічних системах[46].

Під час проведення досліджень було встановлено, що сорбційні властивості біовугілля значною мірою залежать від початкової концентрації забруднювача, що свідчить про наявність як фіксованої кількості активних центрів адсорбції, так і про їх структурну різнотипність. За низьких концентрацій малахітового зеленого (до 10 мг/дм³) ефективність очищення перевищувала 90 %, що свідчить про швидке насичення найбільш активних сорбційних ділянок. При підвищенні концентрації барвника ефективність знижувалася до 60–70 %, що характерно для природних сорбентів, у структурі яких переважають мікро- та мезопори. Це підтверджує, що біовугілля здатне забезпечувати високу ефективність очищення у випадку слабозабруднених стічних вод, але вимагає збільшення дози сорбенту в умовах високих концентрацій забруднювачів[51].

рН середовища є важливою характеристикою, що впливає на здатність біовугілля сорбувати. Встановлено, що ефективність поглинання барвника максимальна за нейтральних або слабколужних умов. Це може бути результатом зменшення електростатичного відштовхування між поверхневими групами біовугілля та катіонною формою малахітового зеленого. У кислому середовищі сорбційна здатність знижується. Це пов'язано з боротьбою іонів водню та молекул забруднювача за активні центри адсорбції.

Одним із визначальних параметрів для оцінки ефективності сорбенту є час, необхідний для досягнення адсорбційної рівноваги. У ході експериментів встановлено, що максимальне поглинання забруднювача відбувається протягом перших 30–60 хвилин, після чого швидкість адсорбції знижується, наближаючись до стаціонарних значень. Це дозволяє стверджувати, що біовугілля має швидку кінетику поглинання, що є важливою перевагою у технологічних процесах, де необхідна висока пропускна здатність систем очищення[50].

Проведена оцінка можливості повторного використання біовугілля показала, що після 3–4 циклів адсорбції-десорбції матеріал зберігає 70–80 % первинної сорбційної здатності. Це свідчить про наявність високої структурної стабільності та хімічної інертності поверхні біовугілля, що робить його придатним для експлуатації в умовах багаторазового використання. Здатність до регенерації значно підвищує економічну доцільність і зменшує екологічне навантаження[43].

Разом з тим застосування біовугілля супроводжується певними ризиками, які необхідно враховувати при його промисловому або комунальному використанні. До основних із них належать:

1. Ризик вторинного забруднення водного середовища внаслідок десорбції барвника за умов перенасичення сорбенту або зміни рН середовища. При досягненні граничної сорбційної ємності активні центри біовугілля можуть вивільняти частину поглинутих речовин, що потребує контролю концентрацій у реальних технологічних процесах.

2. Ймовірність перенесення у воду мікрочастинок або дрібнодисперсних фракцій біовугілля, які можуть утворюватися під час шейкерного перемішування або підвищеного гідродинамічного навантаження. Це вимагає застосування систем додаткового фільтрування або стабілізації структури сорбенту.

3. Можливе вимивання неорганічних компонентів, якщо вихідна біомаса містила мінеральні домішки. У дослідженні виявлено, що біовугілля,

отримане за температури піролізу понад 500 °C, має низьку здатність до вивільнення мінеральних речовин, що робить його більш екологічно безпечним[49].

4. Деградація структури при багаторазовому використанні, що може проявлятися у зменшенні питомої поверхні та змінах порової структури. Це знижує сорбційну здатність, проте у межах експерименту деградація не була суттєвою.

5. Наявність слідів поліциклічних ароматичних вуглеводнів, утворених при низькотемпературному піролізі (<400 °C). Для запобігання цьому необхідно забезпечувати контроль температурних параметрів під час виробництва[47].

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що за умови правильно підібраних технологічних параметрів (доза, рН, час контакту) біовугілля є високоефективним і безпечним сорбентом. Завдяки своїй структурній стабільності, можливості регенерації та низькій вартості матеріал має значний потенціал впровадження у локальні та промислові системи водоочистки[52].

З екологічної точки зору застосування біовугілля сприяє зменшенню антропогенного навантаження на природні водні ресурси, знижує обсяг утворення небезпечних відходів і сприяє повторному використанню біомаси. Комплексний аналіз показує, що біовугілля може стати одним із ключових елементів сучасних екотехнологій, спрямованих на очищення стічних вод та забезпечення екологічної безпеки водних екосистем[44].

ВИСНОВКИ

1. Біовугілля є перспективним матеріалом для застосування в різних галузях. Особливістю його є утворення внаслідок процесу повільного піролізу, в результаті якого отримується матеріал, здатний виступати ефективним поглиначем вуглецю з відновлюваних та сталих джерел біомаси.

2. Характеристики біовугілля різноманітні і залежать від типу біомаси, яка використовується для його виробництва, і середовища, в якому відбувається піроліз. Біовуглець має такі властивості, як стабільність, питома поверхня, пористість і хімічний склад.

3. Біологічне вугілля для очищення стічних вод використовується завдяки таким характеристикам: велика питома поверхня та багато поверхнево-активних функціональних груп для видалення рідких забруднюючих речовин зі стічних вод, таких як важкі метали, пестициди, органічні важкі метали, пестициди, органічні забруднювачі, азот і фосфор. На адсорбцію забруднюючих речовин біологічним вугіллям впливають три основні фактори: кількість біопалива, рН навколишнього середовища та тривалість контакту.

4. Для очищення промислових стічних вод зазвичай використовується поєднання фізичних, біологічних і хімічних методів, іноді в певному порядку, оскільки ці методи максимізують видалення різних забруднювачів, особливо органічних і неорганічних.

5. У результаті проведених досліджень встановлено, що біовугілля є ефективним, доступним та екологічно безпечним сорбентом для очищення стічних вод, забруднених малахітовим зеленим. Під час виконання лабораторних експериментів було визначено вплив основних факторів процесу адсорбції — початкової концентрації забруднювача, дози біовугілля, рН розчину та часу контакту — на сорбційну здатність матеріалу.

6. Доведено, що ефективність видалення забруднювача зростає зі зменшенням його початкової концентрації, оскільки більша кількість активних центрів біовугілля залишається доступною для взаємодії з

молекулами барвника. За низьких концентрацій досягалася ефективність понад 90%, тоді як за високих — значно нижча.

7. Виявлено, що підвищення дози біовугілля збільшує ступінь очищення, що пов'язано зі зростанням площі поверхні та кількості доступних адсорбційних центрів. Оптимальна доза становила 0,2 г, за якої ефективність видалення досягала 89–93%. Подальше збільшення маси сорбенту не приводило до суттєвого підвищення результату, що вказує на встановлення рівноважного стану.

8. Результати дослідження впливу рН показали, що найбільша ефективність адсорбції досягається в нейтральному та слабколужному середовищі (рН 6–8). За кислих значень рН сорбційна здатність знижувалася, що пов'язано зі зміною поверхневого заряду біовугілля та ступеня протонування молекул барвника.

9. Проведений аналіз кінетики показав, що ефективність очищення зростає зі збільшенням часу контакту, досягаючи рівноваги у межах 60–120 хв. Після цього подальше збільшення часу не давало істотного приросту адсорбції, що свідчить про насичення поверхні біовугілля.

10. Екологічний аналіз показав, що використання біовугілля для очищення стічних вод забезпечує низку важливих переваг: зменшення концентрації токсичних речовин у воді, покращення її фізико-хімічних показників, зниження екологічного ризику, а також можливість багаторазового застосування сорбенту за умови регенерації. Крім того, біовугілля виробляється з відновлюваної сировини та сприяє зменшенню обсягів відходів, що робить його екологічно вигідним рішенням.

Таким чином, результати роботи підтверджують перспективність застосування біовугілля як ефективного та екологічно безпечного сорбента у технологіях очищення стічних вод. Отримані дані можуть бути використані для розроблення оптимізованих методик водоочищення, удосконалення адсорбційних процесів і впровадження біовугілля в екологічно орієнтовані промислові та локальні системи очистки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Використання біовугілля в сільському господарстві та фермерстві [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.bestongroup.com/uk/biochar-use-in-agriculture-and-farming/>
2. Дубенська В., Лавринюк З. Екологічний аналіз використання бовугілля як сорбента для очистки стічних вод. Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, студентів та аспірантів «Актуальні проблеми розвитку природничих та гуманітарних наук (14 листопада 2024 року). Луцьк: ВНУ ім. Лесі Українки, 2024. С. 418-421
3. Дубенська В, Лавринюк З.В. Екологічні аспекти застосування біовугілля для очистки стічних вод. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молода наука Волині: пріоритети та перспективи досліджень» (15 травня 2024 року). Луцьк: ВНУ ім. Лесі Українки, 2024, С. 1062-1065.
4. A holistic treatment system for palm oil mill effluent by incorporating the anaerobic-aerobic-wetland sequential system and a convective sludge dryer / M. A. Ahmad Farid et al. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 369. P. 195–204. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.033>
5. Adsorption of heavy metal from industrial wastewater onto low-cost Malaysian kaolin clay-based adsorbent. J.-B. Chai et al. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27, no. 12. P. 13949–13962. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07755-y>
6. Applicability of various pretreatment techniques to enhance the anaerobic digestion of Palm oil Mill effluent (POME): A review. S. N. B. A. Khadaroo et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019. Vol. 7, no. 5. P. 103310. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103310>

7. Atkinson C. J., Fitzgerald J. D., Hipps N. A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*. 2010. Vol. 337, no. 1-2. P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
8. Biochar 2018 - International Biochar Initiative. International Biochar Initiative. URL: <https://www.biochar-international.org/biochar>
9. Biochar: A Black Carbon for Sustainable Agriculture. M. R. F. Banu et al. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 418–432. URL: <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i61840>
10. Blanco-Canqui H. Biochar and Water Quality. *Journal of Environmental Quality*. 2019. Vol. 48, no. 1. P. 2–15. URL: <https://doi.org/10.2134/jeq2018.06.0248> 37
11. Characterization of Biochar Obtained from Olive and Hazelnut Prunings and Comparison with the Standards of European Biochar Certificate (E.B.C.). L. M. Abenavoli et al. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2016. Vol. 223. P. 698–705. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.244>
12. Chimdi C. M., Achaw O., Lebu S., Nakagiri A., Semiyaga S., Terna O, Manga M. Biochar as a novel technology for treatment of onsite domestic wastewater: A critical review. *Water and Wastewater Management*. 23 February 2023. Vol. 11, URL: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2023.1095920/full>
13. Competitive removal of Cd(ii) and Pb(ii) by biochars produced from water hyacinths: performance and mechanism. Y. Ding et al. *RSC Advances*. 2016. Vol. 6, no. 7. P. 5223–5232. URL: <https://doi.org/10.1039/c5ra26248h>
14. Current Trends in the Application of Nanomaterials for the Removal of Pollutants from Industrial Wastewater Treatment—A Review. G. Palani et

- al. *Molecules*. 2021. Vol. 26, no. 9. P. 2799. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26092799>
15. Deng S., Chen J., Chang J. Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: Performance and ecological benefits. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 293. P. 126156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126156>
 16. Dynamic membrane applications in anaerobic and aerobic digestion for industrial wastewater: A mini review. S. B. Mahat et al. *Food and Bioproducts Processing*. 2018. Vol. 112. P. 150–168. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.09.008>
 17. Earth Systems and Environmental Sciences Reference Module. *Choice Reviews Online*. 2014. Vol. 51, no. 07. P. 51–3585–51–3585. URL: <https://doi.org/10.5860/choice.51-3585>
 18. El-Shafey E. I. Removal of Zn(II) and Hg(II) from aqueous solution on a carbonaceous sorbent chemically prepared from rice husk. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 175, no. 1-3. P. 319–327. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.006>
 19. Evidence for a Pore-Filling Mechanism in the Adsorption of Aromatic Hydrocarbons to a Natural Wood Char. T. H. Nguyen et al. *Environmental Science & Technology*. 2007. Vol. 41, no. 4. P. 1212–1217. URL: <https://doi.org/10.1021/es0617845>
 20. Freddo A., Cai C., Reid B. J. Environmental contextualisation of potential toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar. *Environmental Pollution*. 2012. Vol. 171. P. 18–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.009>
 21. Interactions of high-rate nitrate reduction and heavy metal mitigation in iron-carbon-based constructed wetlands for purifying contaminated groundwater. L. Jia et al. *Water Research*. 2020. Vol. 169. P. 115285. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115285>

22. Investigating the effect of biochar and fertilizer on the composition and function of bacteria in red soil. M. Zhang et al. *Applied Soil Ecology*. 2019. Vol. 139. P. 107–116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.03.021>
23. Kusworo T. D., Kumoro A. C., Utomo D. P. Phenol and ammonia removal in petroleum refinery wastewater using a poly(vinyl) alcohol coated polysulfone nanohybrid membrane. *Journal of Water Process Engineering*. 2020. P. 101718. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101718>
24. Lead and cadmium sorption mechanisms on magnetically modified biochars. L. Trakal et al. *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 203. P. 318–324. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.056>
25. Lehmann J. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2007. Preprint, no. 2007. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1890/060133>
26. Manyà J. J. Pyrolysis for Biochar Purposes: A Review to Establish Current Knowledge Gaps and Research Needs. *Environmental Science & Technology*. 2012. Vol. 46, no. 15. P. 7939–7954. URL: <https://doi.org/10.1021/es301029g>
27. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. J. L. Faulwetter et al. *Ecological Engineering*. 2009. Vol. 35, no. 6. P. 987–1004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.030>
28. Performance evaluation of the pilot scale upflow anaerobic sludge blanket – Downflow hanging sponge system for natural rubber processing wastewater treatment in South Vietnam. T. Watari et al. *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 237. P. 204–212. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.058>
29. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. S. Gul et al. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2015. Vol. 206. P. 46–59. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>

30. Phytoremediation of Aluminum and Iron from Industrial Wastewater Using *Ipomoea aquatica* and *Centella asiatica* / M. M. Hanafiah et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, no. 9. P. 3064. URL: <https://doi.org/10.3390/app10093064>
31. Pignatello J. J., Kwon S., Lu Y. Effect of Natural Organic Substances on the Surface and Adsorptive Properties of Environmental Black Carbon (Char): Attenuation of Surface Activity by Humic and Fulvic Acids. *Environmental Science & Technology*. 2006. Vol. 40, no. 24. P. 7757–7763. URL: <https://doi.org/10.1021/es061307m>
32. Potential hazards of biochar: The negative environmental impacts of biochar applications. L. Xiang et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 420. P. 126611. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126611>
33. Rahman M. Z., Edvinsson T., Kwong P. Biochar for electrochemical applications. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2020. Vol. 23. P. 25–30. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.04.007>
34. Razman K. K., Hanafiah M. M., Mohammad A. W. An overview of LCA applied to various membrane technologies: Progress, challenges, and harmonization. *Environmental Technology & Innovation*. 2022. P. 102803. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102803>
35. Removal of arsenic by magnetic biochar prepared from pinewood and natural hematite. S. Wang et al. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 175. P. 391–395. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.104>
36. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. D. A. Laird et al. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2009. Vol. 3, no. 5. P. 547–562. URL: <https://doi.org/10.1002/bbb.169>
37. Roles of biochar media and oxygen supply strategies in treatment performance, greenhouse gas emissions, and bacterial community features of subsurface-flow constructed wetlands. B. Ji et al. *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 302. P. 122890. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122890>

38. Sorption of the herbicide terbuthylazine in two New Zealand forest soils amended with biosolids and biochars. H. Wang et al. *Journal of Soils and Sediments*. 2009. Vol. 10, no. 2. P. 283–289. URL: <https://doi.org/10.1007/s11368-009-0111-z>
39. Sustainable biochar for advanced electrochemical/energy storage applications. S. Rawat et al. *Journal of Energy Storage*. 2023. Vol. 63. P. 107115. URL: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107115>
40. Tan, Z.; Zou, J.; Zhang, L.; Huang, Q. Morphology, Pore Size Distribution, and Nutrient Characteristics in Biochars under Different Pyrolysis Temperatures and Atmospheres. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 2018, 20, 1036–1049 URL: https://www.researchgate.net/publication/319864410_Morphology_pore_size_distribution_and_nutrient_characteristics_in_biochars_under_different_pyrolysis_temperatures_and_atmospheres
41. Understanding oily wastewater treatment via membrane distillation. L. Han et al. *Journal of Membrane Science*. 2017. Vol. 539. P. 284–294. URL: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.06.012>
42. Verheijen F.G.A., Jeffery S., Bastos A.C., van der Velde M., Dias I., Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. 2012, 426. URL: https://www.researchgate.net/publication/258842182_Biochar_Application_to_Soils__A_Critical_Scientific_Review_of_Effects_on_Soil_Properties_Processes_and_Functions
43. Wang H., Xu J., Sheng L. Preparation of straw biochar and application of constructed wetland in China: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 273. P. 123131. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123131>
44. Wang, J.; Wang, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *J. Clean. Prod.* 2019, 227, 1002–1022 DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.282-8aAidxEALw_wcB

45. Wastewater treatment: biological and chemical processes. *Choice Reviews Online*. 1996. Vol. 33, no. 08. P. 33–4531–33–4531. URL: <https://doi.org/10.5860/choice.33-4531>
46. Yaashikaa, P.R.; Kumar, P.S.; Varjani, S.; Saravanan, A. A Critical Review on the Biochar Production Techniques, Characterization, Stability and Applications for Circular Bioeconomy. *Biotechnol. Rep.* 2020, 28, e00570. DOI: 10.1016/j.btre.2020.e00570
47. Yu, L.; Yuan, Y.; Tang, J.; Wang, Y.; Zhou, S. Biochar as an electron shuttle for reductive dechlorination of pentachlorophenol by *Geobacter sulfurreducens*. 2015, 5, 16221 DOI: 10.1038/srep16221
48. Zhang M., Muhammad R., Zhang L., Xia H., Cong Ming., Jiang C. Investigating the effect of biochar and fertilizer on the composition and function of bacteria in red soil. *Journal of Applied Soil Ecology*. 2019. Vol. 139. P. 107–116. DOI: 10.1016/j.apsoil.2019.03.021
49. Zhang, C.; Zhang, N.; Xiao, Z.; Li, Z.; Zhang, D. Characterization of biochars derived from different materials and their effects on microbial dechlorination of pentachlorophenol in a consortium.. 2019, 9, 917–923. DOI: 10.1039/C8RA09410A
50. Zhao, L.; Cao, X.; Zheng, W.; Wang, Q.; Yang, F. Endogenous minerals have influences on surface electrochemistry and ion exchange properties of biochar. *Chemosphere* 2015, 136, 133–139. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.04.053
51. Zhou C., Fasel C., Ishikawa R., Gallei M., Ikuhara Y., Lauterbach S., Kleebe H.-J., Riedel R. and. Ionescu E , One-pot synthesis of a C/SiFeN(O)-based ceramic paper with in-situ generated hierarchical micro/nano-morphology., 2017, 37 , 5193 —5203 DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.03.007
52. Zhuang X., Jin K., Zhang Q., Liu J., Zhang X., Zhan H. and Ma L., One-pot synthesis of FexOy nanoparticles embedded within N-doped carbon

layers as highly efficient and selective catalysts for the hydrogenation of nitroarenes, 2022, 33 , 3 —26.DOI: 10.1016/j.cclet.2022.107954