

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра екології та технології рослинних полімерів

«На правах рукопису»
УДК 628.166:663.63

«До захисту допущено»

В. о. завідувача кафедри
Віта ГАЛИШ

« » 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

«Промислова екологія та ресурсоефективні чисті технології»

зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»

**на тему: «Використання модифікованих сорбентів на основі торфу для
вилучення важких металів з водних розчинів»**

Виконала:

студентка II курсу, групи ЛЦ-41м

Тарадай Майя Сергіївна

Керівник:

доц., д.т.н.

Хохотва Олександр Петрович

Консультант з розділу стартап проекту:

доцент, к.е.н., доцент кафедри промислового маркетингу,

Юдіна Наталія Володимирівна

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студентка _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології

Кафедра екології та технології рослинних полімерів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 161 Хімічні технології та інженерія

Освітньо-професійна програма «Промислова екологія та ресурсоефективні
чисті технології»

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис) Віта ГАЛИШ (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Тарадай Майя Сергіївна

1. **Тема дисертації** «Використання модифікованих сорбентів на основі торфу для вилучення важких металів з водних розчинів», науковий керівник дисертації Хохотва Олександр Петрович, к.т.н, доц., затверджена наказом по університету від «3» листопада 2025 р. № 4744-с
2. **Термін подання студентом дисертації** 15 грудня 2025р_____
3. **Об'єкт дослідження:** верховий торф, активатори різних типів .
4. **Предмет дослідження:** : сорбційні властивості сорбентів, отриманих на основі верхового торфу шляхом хімічної активації, для очищення води від іонів металу.
5. **Перелік завдань, які потрібно розробити:** 1. Провести аналітичний огляд сучасних методів очищення стічних вод від іонів важких металів, а також

проаналізувати хімічну будову та сорбційні властивості торфу як природної сировини та його модифікацій. 2. Розробити методику хімічної модифікації торфу різними реагентами (кислотами, лугами, окисниками) з метою підвищення його сорбційної здатності та стабільності. 3. Дослідити вплив ключових технологічних параметрів (концентрація модифікатора, час контакту, рН розчину, початкова концентрація іонів металів) на ефективність вилучення іонів важких металів модифікованими сорбентами. 4. Визначити оптимальні умови процесу сорбції для максимального вилучення цільових іонів, включаючи час досягнення рівноваги. 5. Встановити кінетичні та рівноважні закономірності процесу сорбції. 6. Дослідити регенераційну здатність модифікованого сорбенту та оцінити можливість його багаторазового використання в циклах сорбція-десорбція. 7. Розробити стартап-проект для практичної оцінки комерційної цінності та економічної доцільності використання розробленого сорбенту на основі торфу для очищення промислових стічних вод.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 9

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1) Хохотва О. П., Сірідюк М. О., Тарадай М. С. ДОСЛІДЖЕННЯ ІОНООБМІННИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФІКОВАНОЇ СОСНОВОЇ ТИРСИ (PINUS SYLVESTRIS L.) У ПРОЦЕСАХ СОРБЦІЇ ІОНІВ Cu^{2+} 2) Хохотва О. П., Тарадай М. С., Сірідюк М. О. ОТРИМАННЯ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНИХ СОРБЕНТІВ З ВЕРХОВОГО ТОРФУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проекту	Юдіна Н.В., доцент, к.е.н., доцент кафедри промислового маркетингу		

9. Дата видачі завдання

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літератури по темі магістерської дисертації	01.09.2025 –30.09. 2025	Виконано
2	Оформлення літературного огляду	01.10.2025 –10.10.2025	Виконано
3	Опрацювання методів дослідження та методик. Проходження практики.	27.10.2025-8.11.2025	Виконано
4	Приготування модифікованого сорбенту	8.11.2025-12.11.2025	Виконано
5	Ізотерма та кінетика сорбції.	12.11.2025-14.11.2025	Виконано
6	Обробка та обговорення отриманих результатів	14.11.2025-15.11.2025	Виконано
7	Розробка стартап-проєкту	16.11.2025-19.11.2025	Виконано
8	Оформлення результатів магістерської дисертації	1.12.2025-12.12.2025	Виконано
9	Підготовка презентації	13.12.2025-14.12.2025	Виконано
10	Представлення роботи до захисту	15.12.2025-22.12.2025	Виконано

Студент

_____ Майя ТАРАДАЙ
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

_____ Олександр ХОХОТВА
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 100 с., 25 табл., 9 рис., 104 посилання.

Об'єкт дослідження: верховий торф, активатори різних типів .

Предмет дослідження: : сорбційні властивості сорбентів, отриманих на основі верхового торфу шляхом хімічної активації, для очищення води від іонів міді (Cu^{2+}).

Мета роботи: розробка методик термохімічного модифікування торфу з використанням різних хімічних активаторів , дослідити ефективність отриманих сорбентів при видаленні з води іонів міді.

В даній роботі досліджено вплив умов отримання сорбенту (концентрація та тип активатора, температура карбонізації,) на сорбцію іонів міді. Одержані результати можуть бути використані для розробки технологій доочистки стічної води.

СОРБЕНТ, ТЕРМОХІМІЧНА АКТИВАЦІЯ ТОРФУ, ТЕМПЕРАТУРА , ХІМІЧНІ РЕАКТИВИ, ВАЖКІ МЕТАЛИ

ABSTRACT

Master's thesis: 100 p., 25 tables, 9 figures, 104 references.

Object of research: peat, activators of various types.

Subject of research: sorption properties of sorbents obtained on the basis of peat by chemical activation, for water purification from copper ions (Cu^{2+})..

Purpose of work: development of a method for thermochemical modification of peat using various chemical activators, to investigate the effectiveness of the obtained sorbents in removing copper ions from water.

In this work, the influence of the conditions for obtaining the sorbent (concentration and type of activator, carbonization temperature,) on the sorption of copper ions was investigated. The results obtained can be used to develop technologies for wastewater treatment.

SORBENT, THERMOCHEMICAL ACTIVATION OF PEAT,
TEMPERATURE, CHEMICAL REAGENTS, HEAVY METALS

Зміст

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	11
СОРБЦІЙНІ МЕТОДИ ОЧИСТКИ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ВІД ВАЖКИХ МЕТАЛІВ	11
1.1 Проблема забруднення водних об'єктів важкими металами та методи її вирішення	11
1.1.1 Важкі метали як забруднювачі	11
1.1.2 Основні технології очищення води від іонів важких металів	14
1.1.3 Переваги сорбційних методів у порівнянні з альтернативними технологіями.	16
1.2. Основи сорбційного вилучення важких металів	17
1.3 Огляд сорбентів, що застосовуються для вилучення важких металів.....	18
1.3.1 Синтетичні сорбенти.....	18
1.3.2. Природні та модифіковані природні сорбенти	19
1.4 Методи отримання модифікованих природних сорбентів : фізична активація та хімічна активація.....	21
1.5 Структура, хімічний склад і сорбційний потенціал торфу у процесах вилучення важких металів	23
Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2	28
ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	28
2.1 Об'єкти досліджень	28
2.2 Методи дослідження.....	28
2.2.1 Реактиви, матеріали, прилади, робочий посуд	28
2.2.2 Приготування сорбентів.....	30
2.2.3 Методика приготування гідроксид калію (KOH) – 30% розчин.....	30
2.2.4 Методика приготування гідроксид калію (KOH) – 30% розчин з додаванням сірки S (15%).....	31
2.2.5 Методика приготування хлорид цинку (ZnCl ₂) – 50% та 30% розчин .	31
2.2.6 Методика приготування суміш (NH ₄) ₃ PO ₄ – 10% + CO(NH ₂) ₂ –10%....	31
2.2.7 Методика приготування 30% та 15% розчину H ₃ PO ₄	31

2.2.8 Методика приготування 10% розчину KI.....	32
2.2.9 Методика приготування розчину Cu^{2+}	32
2.2.10 Методика приготування Ni^{2+}	33
2.2.11 Дослідження кінетики сорбції іонів	33
2.2.12 Дослідження ізотерми сорбції.....	34
2.2.13 Методика для визначення зольності.....	35
РОЗДІЛ 3	37
ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	37
3.1 Аналіз сировини.....	37
3.2 Вплив активатора та температури термічної обробки на ефективність вилучення важких металів	38
3.3 Аналіз візуальних спостережень після термічної активації	43
3.4 Дослідження ізотерм та кінетики сорбції на модифікованому і немодифікованому торфі.....	44
3.4 Утилізація відпрацьованого сорбенту після використання	50
Висновок до розділу 3	51
РОЗДІЛ 4	54
РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТ	54
4.1 Опис ідеї проєкту	54
4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту	57
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту.....	59
4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту.....	72
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	78
Висновки до розділу 4	84
ВИСНОВОК.....	86
СПИСОК ДЖЕРЕЛ	88
ДОДАТОК А.....	99

ВСТУП

Забруднення водних ресурсів іонами важких металів є однією з найгостріших та найнебезпечніших екологічних проблем сучасності, що має глобальний характер і безпосередньо впливає на стан довкілля, здоров'я населення та біологічну рівновагу екосистем. Інтенсивний розвиток промисловості, гірничодобувної галузі, металургії, хімічного виробництва, а також сільського господарства супроводжується значними викидами токсичних сполук у водні об'єкти. Унаслідок цього поверхневі та підземні води дедалі частіше містять підвищені концентрації іонів важких металів, що не піддаються природному самоочищенню.

Особливу небезпеку становлять іони таких металів, як свинець (Pb^{2+}), кадмій (Cd^{2+}), ртуть (Hg^{2+}), мідь (Cu^{2+}) та цинк (Zn^{2+}), які належать до групи стійких токсикантів. Ці елементи здатні до біоаккумуляції та біомагніфікації, що призводить до їх накопичення в живих організмах і передавання трофічними ланцюгами. Потрапляючи в організм людини навіть у малих концентраціях, іони важких металів можуть викликати порушення роботи нервової, серцево-судинної, імунної та репродуктивної систем, а також спричиняти мутагенні та канцерогенні ефекти. Саме тому контроль і зменшення вмісту важких металів у воді є важливим завданням сучасної екологічної та хімічної науки.

Традиційні методи очищення води, зокрема коагуляція, фільтрація, хімічне осадження та мембранні технології, не завжди забезпечують необхідний рівень очищення, особливо за низьких концентрацій забруднювачів. Крім того, ці методи часто характеризуються високими енергетичними витратами, утворенням вторинних відходів і складністю експлуатації. У зв'язку з цим зростає інтерес до альтернативних та більш екологічно безпечних технологій, серед яких провідне місце посідають сорбційні методи очищення води.

Особливу увагу привертають поліфункціональні сорбенти — сучасні матеріали, здатні реалізовувати кілька механізмів поглинання одночасно, зокрема іонообмін, комплексоутворення, фізичну та хемосорбцію. Такі сорбенти

отримують шляхом модифікації природних матеріалів (цеолітів, активованого вугілля, хітозану, торфу) або синтезу нових полімерних і неорганічних сполук із наперед заданими функціональними групами. Завдяки цьому вдається значно підвищити селективність сорбентів до певних іонів важких металів, збільшити їх сорбційну ємність, механічну міцність і стабільність у широкому діапазоні рН та іонної сили середовища.

Метою даного дослідження є розробка ефективного поліфункціонального сорбенту на основі верхівкового торфу та експериментальне визначення його здатності до вилучення іонів важких металів із водних розчинів. Торф є природним, екологічно безпечним і доступним матеріалом, що характеризується високою пористістю, значною питомою поверхнею та наявністю великої кількості функціональних груп (карбоксильних, гідроксильних, фенольних), які беруть активну участь у процесах сорбції. Це робить його перспективною сировиною для створення недорогих, ефективних та відновлюваних сорбційних матеріалів.

Дослідження, спрямовані на розробку торф'яних сорбентів, мають важливе наукове й практичне значення. Їх результати можуть бути використані при створенні технологій очищення стічних вод промислових підприємств, локальних систем водопідготовки, а також у побутових фільтраційних установках. Використання сорбентів на основі природної сировини сприяє зниженню техногенного навантаження на довкілля, покращенню якості питної води та формуванню стратегії сталого водокористування, що є необхідною умовою збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь.

РОЗДІЛ 1

СОРБЦІЙНІ МЕТОДИ ОЧИСТКИ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ВІД ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

1.1 Проблема забруднення водних об'єктів важкими металами та методи її вирішення

1.1.1 Важкі метали як забруднювачі

Зазвичай важкими металами вважають елементи з атомною масою від 63,5 до 200,6 та питомою вагою понад 5,0. Інтенсивний розвиток промислових галузей, такої як текстильної, гірничо-видобувної, виробництва мінеральних добрив і пестицидів, шкіряних виробів, акумуляторів, паперу і целюлози, ювелірної справи, карбування монет тощо, супроводжується скиданням стічних вод, що містять іони важких металів. Це має безпосередній або опосередкований вплив на навколишнє середовище, особливо у країнах, що розвиваються [10-11]. До токсичних і небезпечних важких металів у промислових стічних водах належать Cr, Cd, Pb, Co, Cu, Fe, Ni, Zn, U у різних ступенях окиснення.

Забруднення Cr (VI) переважно пов'язане з низкою промислових застосувань шестивалентного хрому у сферах виробництва енергії, виготовлення металів і хімікатів, а також подальшого поводження з відходами та стічними водами. У воді хром переважно існує у двох ступенях окиснення — Cr (III) і Cr (VI), а також у відповідних іонних формах, що залежать від значень рН, окисно-відновного потенціалу та наявності природних відновників. Шестивалентні сполуки хрому є небезпечними через їхню токсичну дію на людей, тварин, рослини та мікроорганізми. Ризики для здоров'я людини варіюються від подразнення шкіри до ушкодження ДНК та розвитку раку — залежно від дози, рівня впливу та тривалості [12].

Іони Cd^{2+} визнані особливо небезпечними. Їхня здатність накопичуватися в тканинах живих організмів і в організмі людини викликає серйозне ураження як еритроцитів, так і центральної нервової системи [13]. Серед відомих

токсичних іонів металічного походження іони у джерелах водопостачання, їх вміст у питній воді має не перевищувати 0,003 мг/л [14-15]

Свинець є одним з основних забруднювачів довкілля, що спричиняє забруднення ґрунтів, води та атмосфери, і небезпечний для водних організмів і людини навіть у низьких концентраціях [17]. Свинець впливає майже на всі органи та системи організму людини. Особливо вразливими є діти віком до 6 років. Низькі концентрації свинцю в крові дітей можуть спричиняти проблеми зі слухом і навчанням, анемію, порушення поведінки, затримку росту, зниження коефіцієнта інтелекту та гіперактивність. Під час вагітності свинець може вивільнятися з кісток матері разом із кальцієм і надходити до організму плода, що сприяє розвитку його кісткової системи [18]. При цьому свинець здатний проникати через плацентарний бар'єр, що може спричинити отруєння плода, порушення його розвитку та передчасні пологи [19]. У дорослих хронічне надходження свинцю в організм може призводити до серцево-судинних розладів, підвищення артеріального тиску, розвитку гіпертонії, зниження функції нирок і проблем у репродуктивній системі [18].

На відміну від багатьох інших важких металів, кобальт донедавна не вважався небезпечним для навколишнього середовища та здоров'я людини. Токсичність кобальту, його механізми дії та клінічні наслідки залежать від форми надходження, шляхів проникнення в організм і джерела походження. Наприклад, іони кобальту та наночастинки мають цитотоксичні властивості, а металічні форми і солі можуть викликати генотоксичні ефекти [19].

Мідь зустрічається у різних формах: Cu^0 (металева мідь), Cu(I) (одновалентний іон міді) та Cu(II) (двовалентний іон міді). Серед них Cu(II) вважається найбільш токсичною та поширеною у довкіллі формою. Він застосовується в гальванопластиці, виробництві фарб і барвників, нафтопереробці, добривах, гірничій справі та металургії, вибухових речовинах, пестицидах і сталеливарній промисловості, і вважається одним із найбільш небезпечних важких металів у стічних водах цих галузей. Щодо впливу на здоров'я людини, мідь є необхідною для підтримання життєдіяльності організму,

вона впливає на розвиток і фізіологічні функції крові, імунної системи, печінки, серця та очей. Надлишок міді викликає гострі шлунково-кишкові симптоми, пригнічення ферментативних систем печінки й навіть порушення рухових функцій [20-21].

Залізо у водному середовищі існує переважно у двох формах: Fe(II) (двовалентне залізо) та Fe(III) (тривалентне залізо). Fe(II) є більш розчинною та біодоступною формою, особливо в умовах низького рівня кисню або зниженого рН, що робить його потенційно більш токсичним для водних організмів. У той час як Fe(III) менш розчинне та схильне до утворення осадів, що зменшує його біодоступність [22]. Надмірна доза заліза може призвести до гемохроматозу — стану, що викликає пошкодження тканин через накопичення заліза. У водному середовищі наявність Fe(II) може сприяти розмноженню залізобактерій, що призводить до неприємного кольору, смаку та запаху води [23].

Нікель (II) є одним із найбільш шкідливих важких металів для здоров'я людини, що спричиняє широкий спектр негативних наслідків для здоров'я, включаючи хронічну втоми, закрепи, втрату апетиту, розумову відсталість, погіршення концентрації уваги, безсоння, порушення координації рухів, підвищений артеріальний тиск, зниження слуху та зору, анемію, безпліддя, ускладнення під час вагітності, синдром центральної нервової системи, нейром'язові ефекти та ослаблення імунної системи [24]. Діти є особливо чутливими до його шкідливого впливу [25].

Цинк (Zn) — перехідний метал, який у природі трапляється переважно у формі двовалентного катіона Zn(II). Він є життєво необхідним мікроелементом для людини, беручи участь у функціонуванні понад 300 ферментів, підтримці імунної системи, загоєнні ран та синтезі білків. Однак надмірне надходження цинку в організм може призвести до токсичних ефектів, таких як нудота, блювання, судоми та порушення функцій імунної системи [26].

У промисловості цинк широко використовується для оцинкування сталі, виробництва акумуляторів, фарб, пластмас, гуми та добрив. Основними джерелами забруднення довкілля цинком є металургійні підприємства,

гірничодобувна промисловість, стічні води та атмосферні викиди. Значні концентрації цинку виявляються в ґрунтах поблизу доріг через зношування шин і гальмівних колодок [27].

У водному середовищі надлишок цинку є токсичним для водних організмів, зокрема риб, молюсків і ракоподібних, викликаючи порушення росту, розмноження та навіть загибель. Цинк може акумулюватися в організмах, що призводить до біоконцентрації [28].

Уран — це важкий метал, який належить до актиноїдного ряду в періодичній таблиці. Він трапляється у вигляді різних ізотопів і є слабо радіоактивним. Найпоширенішим і найважчим ізотопом є уран-238, період напіврозпаду якого становить до 4,5 мільярда років. Протягом багатьох десятиліть уран використовується в медичній сфері, а також як паливо в ядерній та аерокосмічній промисловості. Однак уран і матеріали на його основі вважаються значною загрозою для навколишнього середовища та живих організмів через свої хімічні та радіологічні властивості. Забруднення важкими металами становить загрозу для водних об'єктів, а отже — і для їхніх мешканців. Серед забруднювачів важкими металами небезпека урану вважається особливо значущою. Оскільки використання урану у виробництві енергії є неминучим, утворення пов'язаних із цим відходів також не можна усунути.

У людей потрапляння урану в організм може призвести до ускладнень, таких як гостра ниркова недостатність і порушення функцій печінки [29].

1.1.2 Основні технології очищення води від іонів важких металів

Оскільки забруднення важкими металами є однією з найважливіших екологічних проблем необхідно вживати відповідних заходів для зниження концентрацій важких металів у воді до допустимого рівня. Для видалення важких металів застосовують іонообмін, екстракцію, мембранну фільтрацію, хімічне осадження, зокрема методи адсорбції.

Наразі процес очищення включає кілька етапів: первинна обробка охоплює початкові фізичні та хімічні процеси очищення, вторинна ґрунтується на біохімічному розкладанні органічних речовин до неорганічних або стабільних органічних сполук. Нарешті, після третього етапу, так званого третинного очищення, стічні води перетворюються на якісну воду, яку можна використовувати для пиття або медичних потреб.

Методи первинного очищення стічних вод включають : відокремлення за допомогою решіток, фільтрація, центрифужне відокремлення, осадження та гравітаційне відокремлення, флотація та коагуляція.

Методи вторинного очищення включають в себе аеробне та анаеробне очищення.

Для третинного очищення використовується широкий спектр методів, включаючи дистиляцію, кристалізацію, випаровування, екстракцію розчинником, окиснення, осадження, іонний обмін, фільтрацію, зворотний осмос, електроліз, електродіаліз та адсорбцію. Дистиляція ґрунтується на випаровуванні води до точки кипіння та подальшої конденсації, забезпечуючи 99% чистоти води, придатної, зокрема, для опріснення морської води. Кристалізація є ефективним способом видалення високих концентрацій розчинених органічних і неорганічних сполук шляхом підвищення концентрації забруднювачів до моменту їх кристалізації [34]. Випаровування, хоча і є енергоємним процесом, ефективне для малих обсягів стічних вод і видалення органічних та неорганічних сполук [35]. Екстракція розчинниками використовує органічні розчинники для вилучення масел, жирів та іонів важких металів (свинцю, кобальту, хрому) [36]. Хімічне окиснення та розширене окиснення застосовуються для усунення токсичних речовин, перетворюючи органічні забрудники на вуглекислий газ [37, 38]. Осадження у третинному очищенні є поширеним фізико-хімічним процесом для видалення іонів металів (хрому та нікелю) шляхом зниження їх розчинності . Іонний обмін відзначається високою ефективністю видалення навіть слідових кількостей забрудників, замінюючи токсичні іони на більш безпечні за допомогою смол .Фільтрація

(мікрофільтрація) ефективна проти емульсій на основі олій, макромолекул та мікроорганізмів, має низькі енергетичні витрати. Зворотний осмос (гіперфільтрація) забезпечує надзвичайно високу ефективність (до 99,99%) видалення розчинених забрудників, мікробів, бактерій та вірусів, що робить його найбільш економічним для отримання надчистої води. Серед електрохімічних методів, електроліз базується на редокс-реакції, осаджуючи іони металів на електродах, а електродіаліз є мембранною технологією для видалення розчинених солей за рахунок електричного потенціалу.

Нарешті, адсорбційний метод є простим і гнучким, використовуючи різні адсорбенти (наприклад, активоване вугілля) для видалення забрудників, хоча потребує вирішення проблем регенерації.

1.1.3 Переваги сорбційних методів у порівнянні з альтернативними технологіями.

Для видалення іонів важких металів використовуються різні традиційні методи, проте вони мають багато недоліків, таких як висока вартість, утворення великої кількості токсичного осаду та проблеми з його утилізацією, значне споживання енергії та необхідність у великих об'ємах хімікатів. Тому виникає потреба у розробці відповідного методу очищення, який буде простим, ефективним, екологічним і недорогим [39]. Порівняно з іншими методами, адсорбція є найкращим варіантом завдяки своїй ефективності й низькій вартості, хоча має і певні недоліки: потребує хімічної регенерації, включає високі витрати на підготовку адсорбенту (наприклад, активованого вугілля), а також зменшення адсорбційної здатності при кожному циклі регенерації [40].

Природні матеріали або певні відходи промислової та сільськогосподарської діяльності можуть бути недорогими альтернативами адсорбентів для видалення іонів важких металів. Вартість є важливим фактором для порівняння адсорбентів. Загалом, адсорбенти можна вважати «низьковартісними», якщо вони потребують мінімальної обробки, є в достатній

кількості або є відходами іншої промисловості чи сільського господарства [41]. Є багато прикладів використання природних адсорбентів для очищення стічних вод від токсичних забруднювачів, таких як барвники та важкі метали; до них належать: жом цукрових буряків, зола вугільного пилу, кокосова стружка, целюлоза з рисової лузги і порошок листя рицини тощо.

1.2. Основи сорбційного вилучення важких металів

Основи сорбційного вилучення важких металів ґрунтуються на здатності сорбентів ефективно зв'язувати іони металів із водного середовища, при цьому ключову роль відіграють кілька взаємопов'язаних механізмів: адсорбція, іонообмін, хемосорбція та комплексоутворення. Адсорбція є фізико-хімічним процесом, під час якого іони металів накопичуються на поверхні сорбенту, утворюючи стійкий шар. Вона може бути фізичною, коли взаємодія відбувається за рахунок ван-дер-ваальсових сил або електростатичних притягань, що робить процес швидким та оборотним, або хімічною (хемосорбцією), коли відбувається утворення міцних ковалентних або координаційних зв'язків між функціональними групами сорбенту та металом. Часто адсорбція комбінується з іншими механізмами, підвищуючи ефективність видалення металів навіть при низьких концентраціях.

Іонообмін є ще одним важливим механізмом, за якого катіони або аніони сорбенту заміщуються на іони забруднювачів. Наприклад, протони або інші катіони сорбенту можуть заміщатися на свинець, кадмій або мідь у воді, що дозволяє регенерувати сорбент після використання. Комплексоутворення передбачає утворення хімічних комплексів між функціональними групами сорбенту ($-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{SH}$) та метал-іонами, що забезпечує високий ступінь селективності. У деяких випадках на поверхні сорбенту також відбувається мікропреципітація металів, коли утворюються малорозчинні осади, що додатково підвищує ефективність видалення забруднювачів.

Ефективність сорбції залежить від фізико-хімічних властивостей сорбенту та умов середовища. Велика площа поверхні та висока пористість матеріалу забезпечують більше доступних активних сайтів, тоді як наявність функціональних груп підвищує селективність до конкретних іонів. Важливим фактором є рН водного середовища, оскільки він впливає на заряд поверхні сорбенту та стан іонів металів, визначаючи інтенсивність електростатичних і хімічних взаємодій. Температура, концентрація іонів, присутність конкурентних іонів і час контакту також суттєво впливають на швидкість і ступінь сорбції.

Сучасні поліфункціональні сорбенти поєднують фізичну та хімічну адсорбцію, іонообмін і комплексоутворення одночасно, що дозволяє підвищити їхню ефективність та селективність у широкому діапазоні умов. Такі матеріали отримують як шляхом модифікації природних речовин — цеоліту, активованого вугілля, хітозану, торфу, так і шляхом синтезу полімерних або неорганічних сорбентів із заданими функціональними групами.

Застосування сорбційних методів у водоочищенні має численні переваги. Вони дозволяють ефективно видаляти важкі метали навіть при низьких концентраціях, забезпечують можливість регенерації сорбенту та відновлення металів, а також є гнучкими і простими у використанні як у промислових системах, так і в побутових фільтрах. Водночас ефективність сорбції потребує ретельного підбору сорбенту, оптимізації умов проведення процесу та контролю за повторним використанням матеріалу. Використання поліфункціональних сорбентів, що поєднують адсорбцію, іонообмін і комплексоутворення, дозволяє значно підвищити ефективність очищення води та забезпечити безпеку водних ресурсів.

1.3 Огляд сорбентів, що застосовуються для вилучення важких металів

1.3.1 Синтетичні сорбенти

Синтетичні сорбенти охоплюють широкий спектр матеріалів: полімерні сорбенти (функціоналізовані полімери, гелі-гідрогелі), неорганічні матеріали

(оксиди, гідроксиди, композити, наноматеріали) й нанокompозити з підвищеною поверхневою активністю.[42] Полімерні сорбенти зазвичай мають задані функціональні групи — амінні ($-\text{NH}_2$), карбоксильні ($-\text{COOH}$), тіолові ($-\text{SH}$) та інші — що дозволяють створювати селективні зв'язки з певними іонами металів [43]. Наприклад, гідрогелі на полімерній основі з великою пористістю й високою функціоналізацією відзначаються хорошою регенерацією та високою сорбційною здатністю .

Неорганічні синтетичні сорбенти, включаючи наноматеріали, забезпечують дуже великі площі поверхні, високу швидкість сорбційного зв'язування й часто гнучкішу функціоналізацію [44]. Наприклад, наночастинки оксидів металів та магнітні нанокompозити дають змогу не лише активно зв'язувати іони важких металів, а й відділяти використаний сорбент магнітним способом для регенерації . Огляд показує, що хоча ці матеріали мають високий потенціал, їхня вартість, складність виробництва і обмежена промислова реалізація залишаються викликами .

1.3.2. Природні та модифіковані природні сорбенти

Природні сорбенти — це матеріали природного походження, які мають здатність зв'язувати і утримувати іони важких металів у водних розчинах. Вони відзначаються доступністю, відносно низькою вартістю та екологічною безпечністю, що робить їх перспективними для застосування як у промислових, так і в побутових системах очищення води [45]. До найбільш поширених природних сорбентів належать торф, цеоліти, глини, хітозан, активоване вугілля та різні види біомаси, включно з аграрними відходами.

Торф є одним із найбільш доступних і поширених сорбентів. Він характеризується високою пористістю та наявністю великої кількості полярних функціональних груп, здатних утворювати слабкі електростатичні та хімічні взаємодії з іонами металів. Торф використовується як у чистому вигляді, так і після хімічної або фізико-хімічної модифікації, що дозволяє підвищити його

сорбційну активність та селективність щодо певних металів, таких як Pb^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} .

Глини (каолінит, бентоніт, смектити) мають високу питому поверхню та шарувату структуру, що забезпечує можливість адсорбції іонів через обмін катіонів і утворення слабких електростатичних зв'язків. Їх часто застосовують у комбінації з полімерними або органічними матеріалами для підвищення сорбційної здатності та механічної стабільності [47].

Хітозан — природний полісахарид, отриманий із панцирів ракоподібних, відзначається високою хімічною активністю та здатністю утворювати комплексні сполуки з катіонами важких металів. Його переваги включають біорозкладність, нетоксичність і можливість функціоналізації (додавання амінних, тіолових або карбоксильних груп), що підвищує селективність та сорбційну здатність.

Активоване вугілля, вироблене з деревини, кокосового горіха або вугільних відходів, має добре розвинену пористу структуру та високу питому поверхню, що робить його універсальним сорбентом. Воно здатне ефективно адсорбувати широкий спектр металів і органічних забруднювачів, хоча його висока вартість та енергомісткість виробництва можуть обмежувати промислове застосування.

Природні сорбенти часто піддають модифікації, щоб підвищити їх сорбційну активність, селективність та механічну стійкість. Модифікації можуть включати хімічну обробку (імпрегнацію амінними або тіоловими групами, окислення карбоксильними групами), імплантацію наночастинок металів або створення композитів із синтетичними полімерними матеріалами. Такі методи дозволяють підвищити швидкість сорбції, максимальну сорбційну здатність та стабільність сорбенту навіть у складних багатокомпонентних водних розчинах [47].

Особливий інтерес становлять біомаси сільськогосподарських відходів — рисова лузга, стебла кукурудзи, багасса цукрової тростини, лушпиння насіння соняшника. Після фізико-хімічної або хімічної обробки такі матеріали здатні ефективно вилучати свинець, кадмій, мідь та інші важкі метали, поєднуючи низьку вартість із високою сорбційною активністю [47].

Таким чином, природні та модифіковані природні сорбенти є доступними, економічними і екологічно безпечними матеріалами для вилучення важких металів із води. Вони дозволяють розробляти низьковартісні фільтрувальні системи та ефективно очищати як промислові стоки, так і питну воду, особливо при комплексному підході з використанням модифікацій та комбінацій з синтетичними компонентами.

1.4 Методи отримання модифікованих природних сорбентів : фізична активація та хімічна активація

Отримання модифікованих природних сорбентів включає два базових підходи — фізичну (термічну або газову) активацію і хімічну активацію (функціоналізацію поверхні). Обидва підходи спрямовані на підвищення питомої поверхні, розвитку пористості та появи/збільшення кількості активних функціональних груп, що взаємодіють з іонами важких металів; вибір конкретного методу залежить від сировини, бажаних властивостей матеріалу і економічних умов [48–50].

Фізична активація зазвичай передбачає дві стадії: попередню карбонізацію (піроліз) органічної сировини в інертній атмосфері з видаленням летких компонентів і наступну активацію при високих температурах у присутності активуючого газу (зазвичай CO_2 або H_2O /пара). У результаті цих операцій відбувається часткове розпрацювання графітоподібних структур, розширення та відкриття пор, зростання питомої поверхні та утворення поверхневих оксигенвмісних груп. Фізична активація застосовується до різних природних матеріалів — торфу, деревної біомаси, лігніну та аграрних відходів — і дозволяє отримати активовані вуглецеві сорбенти з переважно фракцією мікро- та мезопорів, що корисно для адсорбції дрібних молекул і частково — іонів металів; вибір параметрів (температура карбонізації, режим газової активації, час) визначає баланс між пористістю, хімічними групами на поверхні й механічною міцністю продукту [51,52]. Для торф'яних матеріалів фізична активація CO_2

часто показує хороші результати у формуванні мезопористої структури та підвищенні сорбційної ємності щодо певних металів [53]. Перевагами фізичної активації є відносна простота процесу, відсутність залишків хімічних агентів у готовому продукті і можливість отримання високопористих матеріалів; недоліками — енергоємність і потреба в сушінні/попередній підготовці сировини.

Хімічна активація (функціоналізація) спрямована не лише на формування пористої структури, але й на введення на поверхню специфічних хімічних груп (карбоксильних, фенольних, амінних, тіолових тощо), які створюють сильні координаційні або ковалентні зв'язки з іонами металів. Існує кілька поширених підходів: обробка кислотами (HCl , H_2SO_4 , HNO_3) для збільшення кількості кисневмісних груп і очищення пор, лужна обробка (NaOH , KOH) для розширення порової мережі та підвищення основності поверхні, імпрегнація реагентами (наприклад, введення полімерних амінів, 2-меркаптобензойних похідних або тіосечовини) для селективної детоксикації конкретних металів, а також осадження/імплантація наночастинок (Fe_3O_4 , оксиди алюмінію чи заліза) для отримання магнітних чи композитних сорбентів з поліпшеними властивостями відокремлення і стійкістю [50,54,55]. Хімічна активація зазвичай дає значне підвищення сорбційної ємності і селективності, наприклад: амінні та тіолові групи підвищують зв'язування кадмію, міді та ртуті відповідно, а оксидні та карбоксильні групи поліпшують утримання свинцю та цинку [56]. Серед недоліків — потреба в реагентах, які треба нейтралізувати або видаляти після обробки, ризик залишків реагентів у продукті, а також додаткові витрати і екологічні питання при масштабуванні.

На практиці часто застосовують комбіновані стратегії: попередня фізична карбонізація для формування пористої матриці з подальшою хімічною функціоналізацією для «тонкої настройки» поверхні під цільові іони металів. Наприклад, торф або деревну біомасу карбонізують, активують парою або CO_2 , а потім імпрегнують розчином амінополімеру або окиснюють азотними/сульфатними кислотами для збільшення числа карбоксильних та

нітрогенвмісних груп — така послідовність підвищує і загальну сорбційну ємність, і селективність до певних катіонів [52,53,55]. Для полегшення відокремлення сорбентів із водних систем дедалі популярнішими стають магнітні модифікації (осадження Fe_3O_4) після активації, що дозволяє забирати використаний сорбент магнітним полем і повторно регенерувати його [54].

У виборі методу слід керуватися критеріями: доступністю сировини, необхідною питомою поверхнею і типом пор (мікро-, мезо-, макропори), цільовою селективністю щодо певних металів, простотою регенерації та екологічними/економічними аспектами виробництва. Для лабораторного та прикладного проєктування також важливими є характерні методи контролю якості отриманих сорбентів: BET-аналіз площі поверхні, визначення порового розподілу, FTIR-спектроскопія для встановлення функціональних груп, SEM/TEM для морфології та хімічний аналіз залишкових домішок [51,52,56].

Отже, фізична і хімічна активації — це комплементарні підходи: перша формує каркас і пористість, друга — створює «хімічні капкани» для іонів важких металів. Комбінація обох дає змогу отримувати модифіковані природні сорбенти з оптимальними характеристиками для ефективного вилучення різних важких металів із водних середовищ.

1.5 Структура, хімічний склад і сорбційний потенціал торфу у процесах вилучення важких металів

Торф є одним із найперспективніших природних органічних матеріалів, який активно вивчається в сучасній науці як ефективний сорбент для вилучення іонів важких металів із водних розчинів. Його унікальні властивості формуються в результаті довготривалого накопичення і часткового розкладання рослинних залишків у водонасиченому, анаеробному середовищі, що спричиняє утворення органо-мінеральної структури з високим вмістом гумінових речовин [57]. Саме гумінові кислоти, фульвокислоти та гуміни, які становлять основну частку

органічної фракції торфу, визначають його здатність до зв'язування катіонів металів через іонний обмін, комплексоутворення та хелатоутворення [58].

Хімічний склад торфу обумовлює його високу реакційну здатність. Гумінові речовини містять численні карбоксильні та фенольні групи, здатні дисоціювати й утворювати негативно заряджені центри, які беруть участь у сорбційних процесах. Структурна організація торфу включає в себе мікро- та мезопори, що збільшують питому поверхню та сприяють проникненню металів у внутрішні шари сорбенту [59]. Саме ці властивості пояснюють високу ефективність торфу щодо зв'язування іонів міді, нікелю, цинку, кадмію та інших екотоксикантів.

Ефективність сорбції значною мірою залежить від типу торфу, оскільки умови формування визначають його кислотність, зольність та структурні характеристики. Верховий торф, який утворюється в умовах живлення атмосферними опадами, містить до 95 % органічної речовини, характеризується високою кислотністю (рН 3–4) та дуже низькою зольністю (1–5 %). Він має підвищений вміст фульвокислот та значну кількість активних функціональних груп, що робить його найефективнішим природним сорбентом серед трьох типів торфів [58]. Перехідний торф має проміжні властивості, тоді як низинний, утворений під впливом мінералізованих ґрунтових вод, характеризується високою зольністю та нижчою сорбційною здатністю [62].

Сорбційний процес у торфі є комплексним і включає декілька одночасних механізмів. Найважливішим з них є іонний обмін, під час якого катіони важких металів заміщують на поверхні торфу рухомі іони водню, кальцію чи магнію. Однак дослідження показують, що провідну роль відіграє саме комплексоутворення, зокрема хелатування, коли карбоксильні та фенольні групи гумінових речовин утворюють стабільні координаційні сполуки з іонами металів [60]. Додаткову участь бере фізична адсорбція в поровій структурі торфу, що обумовлює утримання металів за рахунок слабких міжмолекулярних взаємодій. У деяких випадках також має місце мікропреципітація, коли на поверхні торфу

утворюються малорозчинні гідроксиди металів, що додатково підвищує загальну ефективність очищення [61].

Значний інтерес у сучасних екотехнологіях викликає модифікований торф, який проходить хімічну чи термічну обробку. Хімічна модифікація, як правило, містить обробку кислотами, лугами або солями металів, що сприяє збільшенню кількості активних центрів сорбції, трансформації поверхневого заряду, розкриттю пор та формуванню більш стабільних комплексних структур. Термообробка може змінювати пористість, збільшувати активну поверхню та підвищувати хімічну стійкість матеріалу [59]. Саме тому модифікований торф здатний утримувати до 85–99 % іонів важких металів, що робить його ефективнішою альтернативою природному, який зазвичай забезпечує 30–60 % вилучення [62].

Практика застосування торфу охоплює широкий спектр екологічних технологій: очищення промислових і побутових стічних вод, фільтрувально-сорбційні системи локальних очисних споруд, біоплато, дренажні фільтри, реагентно-сорбційні системи комбінованої дії. Торф широко використовується в очищенні шахтних і зливових вод, у системах доочистки після біологічного очищення, у водоочисних установках, призначених для малих підприємств [62]. Завдяки своїй доступності, низькій вартості, екологічній безпечності та можливості регенерації торф розглядається як один з найперспективніших природних сорбентів для заміни дорогих синтетичних матеріалів чи активованих вуглеців.

Таким чином, торф є унікальним природним матеріалом, що поєднує складну органічну структуру, значну кількість функціональних груп, високу пористість та багатофункціональність сорбційних механізмів. Особливо високий потенціал має верховий торф, який завдяки властивостям своєї органічної матриці демонструє найбільшу ефективність у вилученні іонів важких металів. Усе це робить торф перспективною сировиною для створення високоефективних сорбентів та інноваційних природоорієнтованих технологій очищення водних середовищ.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було проаналізовано проблему забруднення водних ресурсів іонами важких металів, визначено основні джерела їх надходження у довкілля та охарактеризовано токсикологічні властивості найбільш поширених елементів, таких як Cr(VI), Cd(II), Pb(II), Cu(II), Ni(II), Zn(II), Fe(II/III) та U. Встановлено, що ці забруднювачі характеризуються високою стійкістю, здатністю до біоаккумуляції та значним негативним впливом на здоров'я людини, водні організми та екосистеми загалом.

Розглянуто сучасні технології очищення води від важких металів, серед яких первинні, вторинні та третинні методи обробки стічних вод. Особливу увагу приділено фізико-хімічним та мембранним процесам (коагуляції, осадженню, іонному обміну, екстракції, електролізу, фільтрації, зворотному осмосу), а також хімічному окисненню та дистиляції. Показано, що, попри ефективність цих технологій, їх застосування часто обмежене високими витратами, утворенням значної кількості токсичних відходів або необхідністю дорогого обладнання.

Проаналізовано переваги сорбційних методів очищення, які вирізняються простотою, екологічною безпечністю, високою ефективністю при низьких концентраціях забрудників, можливістю регенерації та повторного використання сорбентів. Встановлено, що природні низьковартісні матеріали, зокрема торф, можуть слугувати перспективною та економічно доступною альтернативою традиційним сорбентам, таким як активоване вугілля чи синтетичні смоли.

Також висвітлено основні механізми сорбційного вилучення важких металів — фізична та хімічна адсорбція, іонообмін, хемосорбція та комплексоутворення. Показано, що ефективність сорбційних процесів визначається площею поверхні, пористістю, хімічною природою функціональних груп сорбенту, умовами середовища (рН, температура, наявність конкурентних іонів) та кінетикою взаємодії.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує доцільність застосування сорбційних технологій, а також обґрунтовує вибір торфу як доступної сировини для створення поліфункціональних сорбентів, здатних ефективно вилучати іони важких металів із водних розчинів. Це створює наукове підґрунтя для подальших експериментальних досліджень у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

За мету дослідження було поставлено отримання модифікаційного сорбенту, отриманого з верхового торфу , використовуючи різні хімічні активатори та температури.

2.1 Об'єкти досліджень

Предмет дослідження є верховий торф та його модифікація

2.2 Методи дослідження

2.2.1 Реактиви, матеріали, прилади, робочий посуд

Під час проведення експериментальної частини науково-дослідної роботи було застосовано такі засоби вимірювальної техніки та випробувальне обладнання:

- Аналітичні терези
- Магнітні мішалки
- Муфельна піч
- Плита
- рН-метр рН340
- Сушильні шафи
- Технічні терези

Лабораторний посуд:

- Колби
- Конічні лійки
- Мірні колби

- Піпетки
- Скляні палички
- Тиглі
- Хімічні стакани
- Циліндри
- Чаши

Сировина:

- Верхівковий торф

Хімічні агенти активації:

- H_3PO_4 30%
- H_3PO_4 15%
- KOH – 30%
- Суміш KOH (30%) + S (15%)
- ZnCl_2 – 50%
- ZnCl_2 – 30%
- Суміш $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ – 10% + $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – 10% (фосфат амонію та

карбамід)

Розчин для сорбції:

- $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Розчин для титрування:

- Натрій тіосульфат
- Розчин нітрату срібла
- Розчини для ізотерми та кінетики адсорбції:
- Метиленовий синій
- Бензол

2.2.2 Приготування сорбентів

Для модифікації торфу використано співвідношення торфу до хімічного активатора 1: 2. У якості хімічних активаторів використовувались :

- H_3PO_4 30%
- H_3PO_4 15%
- KOH – 30%
- Суміш KOH (30%) + S (15%)
- ZnCl_2 – 50%
- ZnCl_2 – 30%
- Суміш $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ – 10% + $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ – 10% (фосфат амонію та карбамід)

Підготовка торфу: Було просушено в сушильній шафі при 105 °С. Наважки сухого торфу (20г) просочували розчинами (40г) протягом 24 годин та розділено кожний зразок по 3 тиглі. Перші зразки відправлено в сушильну шафу на 2 години при 200°C, а наступні при 300°C та 400°C в муфельну піч. Після термічної обробки зразки було охолоджено, прокип'ячено у воді , а потім відфільтровано для видалення залишків реагентів. Відмиті зразки висушували при 105 °С і використовували для проведення досліджень.

2.2.3 Методика приготування гідроксид калію (KOH) – 30% розчин

Твердий KOH (лускатий або гранульований). Приготування: Відважено 30 г KOH . Додано до 70 мл дистильованої води при постійному перемішуванні. Остуджено до кімнатної температури (реакція екзотермічна). Об'єм доведено до 100 мл.

2.2.4 Методика приготування гідроксид калію (KOH) – 30% розчин з додаванням сірки S (15%)

Окремо приготовано 30% розчин KOH . Порошкоподібну сірку ретельно розтерто в ступці. Відважено 15 г сірки, додано до 100 мл 30% KOH, перемішано до отримання однорідної суспензії. У разі необхідності нагрівали до легкого підігрівання (~40–50°C) для кращого диспергування сірки.

2.2.5 Методика приготування хлорид цинку (ZnCl₂) – 50% та 30% розчин

Чистий безводний ZnCl₂ (або гексагідрат з відповідною поправкою на масу). Приготування для 50% : Відважено 20 г ZnCl₂ та розчинено в 20 мл дистильованої води. Для 30% : ZnCl₂ 12г , дистильованої води 38мл.

2.2.6 Методика приготування суміш (NH₄)₃PO₄ – 10% + CO(NH₂)₂ –10%

Окремо зважено 4 г триамонійфосфату ((NH₄)₃PO₄) та 4г карбаміду (CO(NH₂)₂). Обидва компоненти розчинено у ~32 мл дистильованої води при перемішуванні.

2.2.7 Методика приготування 30% та 15% розчину H₃PO₄

Для приготування 30% та 15% розчину ортофосфатної кислоти (H₃PO₄) використовували концентровану кислоту з вмістом 35%. Розчин готували шляхом розведення концентрату дистильованою водою у відповідному співвідношенні. Необхідний об'єм концентрованої кислоти розраховували за формулою розведення:

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

, де $C_1=35\%$ — концентрація вихідної кислоти, C_2 — необхідна концентрація, $V_2=40$ мл — кінцевий об'єм розчину. Таким чином, для приготування 40 мл 30% розчину відмірювали приблизно 34,3 мл концентрованої H_3PO_4 , а для 15% - 17,14 мл

Процедуру проводили з дотриманням правил хімічної безпеки у витяжній шафі. У мірну колбу спочатку наливали дистильовану воду, після чого повільно додавали до неї відміряну кількість концентрованої кислоти. Кислоту обов'язково додавали у воду, а не навпаки, щоб уникнути перегрівання та розбризкування. Суміш ретельно перемішували, після чого доводили об'єм дистильованою водою до 40 мл. Отримані розчини зберігали у щільно закритому флаконі з відповідним маркуванням.

2.2.8 Методика приготування 10% розчину KI

В 100 мл дистильованої води внести 10 г солі йодиду калію. Добре перемішати до повного розчинення кристалів солі KI.

2.2.9 Методика приготування розчину Cu^{2+}

Розчин мідного купоросу (Cu^{2+} – 104 мг/л): Сіль: $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (мідний купорос п'ятиводний) . Молекулярна маса $CuSO_4 \cdot 5H_2O \approx 249,7$ г/моль, містить 63,5 г/моль Cu, тобто 25,4% Cu за масою. Розрахунок маси солі для розчину 135 мг/л Cu, щоб отримати 104 мг/л Cu:

$$\frac{104}{0,254} = 409(\text{мг}) CuSO_4 \cdot 5H_2O$$

Приготування: Відважено 0,409 г $CuSO_4 \cdot 5H_2O$. Розчинено у невеликому об'ємі дистильованої води. Об'єм доведено до 1000 мл (1 л). За потреби готували більший об'єм у тому ж співвідношенні.

2.2.10 Методика приготування Ni^{2+}

Для приготування 1 літру робочого розчину іонів Ni^{2+} з концентрацією $C_0 = 100 \text{ мг/дм}^3$ безпосередньо з наважки солі $\text{NiCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$, необхідна маса наважки розраховується наступним чином. Використовуємо формулу:

$$m(\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = \frac{C_0 \cdot V}{1000} \cdot \frac{M(\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})}{M(\text{Ni})} = \frac{100 \cdot 1}{1000} \cdot \frac{237,7}{58,7} = 0,405 \text{ (г)}$$

Таким чином, для приготування 1 дм^3 розчину Ni^{2+} з концентрацією 100 мг/дм^3 необхідно точно відважити 0,405 г $\text{NiCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ та довести об'єм до 1000 см^3 дистильованою водою.

2.2.11 Дослідження кінетики сорбції іонів

Дослідження кінетики сорбції іонів Cu^{2+} проводили для визначення оптимального часу контакту між сорбентом та розчином, необхідного для досягнення сорбційної рівноваги.

Експерименти проводили в статичних умовах за постійних, точно визначених параметрів:

- Сорбат: іони Cu^{2+}
- Початкова концентрація іонів $\text{Cu}^{2+} = 104 \text{ мг/дм}^3$;
- Маса наважки сорбенту (m): 1,0 г;
- Об'єм розчину (V): 100 см^3 (0,1 дм^3);
- Співвідношення Т:Р (тверда фаза: рідка фаза): 1:100 (1 г сорбенту на 100 см^3 розчину);
- Оптимальне значення рН розчину: встановлене на попередньому етапі (наприклад, 5,5–6,0);
- Температура (Т): кімнатна

Для дослідження було підготовлено серію конічних колб об'ємом 250 см^3 . У кожену колбу поміщали точно відважену наважку сорбенту (1,0 г) та додавали 100 см^3 робочого розчину Cu^{2+} з концентрацією 104 мг/дм^3 . Колби розміщували

на механічному струшувачі (з постійною швидкістю обертання, 180 об/хв) для забезпечення інтенсивного контакту фаз. Проби розчину відбирали через фіксовані проміжки часу, які охоплювали весь період до встановлення рівноваги (хв): 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 160, 200 хвилин та 24 години. Після відбору проби розчин негайно фільтрували через паперовий фільтр "синя стрічка" або мембранний фільтр (0,45 мкм) для повного відділення частинок сорбенту. У фільтраті визначали залишкову концентрацію іонів Cu^{2+} (C_t) методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. Сорбційну ємність сорбенту в момент часу t (q_t , мг/г) розраховували за формулою:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m}$$

Отримані експериментальні дані будуть використані для побудови графіка залежності $q_t = f(t)$ та для подальшого моделювання процесу за допомогою лінеаризованих форм кінетичних моделей: кінетики псевдо-першого порядку (модель Лагергрена) та кінетики псевдо-другого порядку. Це дозволить визначити константи швидкості сорбції та ідентифікувати лімітуючу стадію процесу.

2.2.12 Дослідження ізотерми сорбції

Дослідження ізотерми сорбції проводили для встановлення максимальної сорбційної ємності сорбенту ($q_{\max}$) та для опису характеру взаємодії між сорбентом та іонами Cu^{2+} у рівноважних умовах.

Експерименти проводили в статичних умовах за постійних параметрів:

- Сорбат: іони Cu^{2+}
- Маса наважки сорбенту (m): 1,0 г;
- Об'єм розчину (V): 100 см³ (0,1 дм³);
- Оптимальний час контакту: визначений при кінетиці;
- Температура (T): кімнатна

Готували серію робочих розчинів Cu^{2+} з різною початковою концентрацією C_0 , що охоплювала широкий діапазон.

У серію конічних колб об'ємом 250 см^3 поміщали наважку сорбенту ($1,0 \text{ г}$) та додавали 100 см^3 робочих розчинів Cu^{2+} з відповідною початковою концентрацією C_0 . Колби розміщували на механічному струшувачі та витримували протягом оптимального часу контакту (часу, необхідного для встановлення рівноваги), визначеного в кінетичних дослідженнях. Після закінчення часу контакту розчин фільтрували ($0,45 \text{ мкм}$), а у фільтраті визначали рівноважну концентрацію іонів Cu^{2+} (C_e) методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії.

Отримані експериментальні дані будуть використані для побудови графіка ізотерми в координатах . Ізотерму сорбції описували за допомогою загальноприйнятих математичних моделей, зокрема:

1. Модель Ленгмюра: передбачає моношарову сорбцію на однорідній поверхні.
2. Модель Фройндліха: описує багатшарову сорбцію на гетерогенній поверхні.

Аналіз констант, отриманих з цих моделей, дозволить зробити висновок про механізм сорбції та визначити максимальну сорбційну ємність

2.2.13 Методика для визначення зольності

Визначення зольності проводили для оцінки вмісту мінеральних компонентів у модифікованому сорбенті на основі торфу.

Для проведення аналізу використовували стандартний гравіметричний метод високотемпературного озолення.

1. Порцеляновий тигель попередньо висушували у сушильній шафі при температурі 105°C до постійної маси, охолоджували в ексікаторі та зважували на аналітичних терезах .

2. У тигель поміщали наважку досліджуваного сорбенту масою та зважували (m_{T+c}).

3. Тигель з наважкою сорбенту поміщали у муфельну піч і проводили озолення при температурі 500°C до повного спалювання органічної частини (до постійної маси золи). Час озолення зазвичай становить 3–4 години.

4. Після озолення тигель охолоджували в ексикаторі до кімнатної температури та зважували (m_{T+z}).

РОЗДІЛ 3

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Аналіз сировини

Торф, як природний ресурс, є об'єктом значного наукового інтересу для створення низьковартісних адсорбентів. Його поділ на верхівковий, перехідний і низинний має ключове значення для визначення сорбційних властивостей. У даному дослідженні було використано верхівковий торф. Незважаючи на високу кислотність (рН 3–4), верхівковий торф має значний хімічний потенціал.

Функціональні групи: Торф багатий на гумінові речовини, які містять велику концентрацію карбоксильних (-COOH) та фенольних (-OH) груп [3]. Ці групи є активними центрами для хемосорбції та іонного обміну.

Наявність цих груп дозволяє ефективно зв'язувати катіони важких металів (як-от Cu^{2+}), що є центральною темою даної роботи. Активація (термічна та хімічна) верхівкового торфу спрямована на максимальне розкриття та збільшення доступності цих сорбційних центрів.

Торф, яким ми використовували має вологість 39%

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1} = \frac{505,19 - 308,06}{505,19} * 100\% = 39\%$$

, де маса сирого торфу $m_1 = 505,19$ г; маса після висушування $m_2 = 308,06$ г.

Зольність була проведена при 500 °C

$$A = \frac{m_1}{m_2} * 100\% = \frac{0,53}{100} * 100\% = 5,3\%$$

, де маса золи після прожарювання $m_1 = 0,53$ г; маса з сухим зразком до прожарювання $m_2 = 10$ г

А отже, торф із низькою зольністю має більше функціональних груп і розвинену пористу структуру, що забезпечує ефективне захоплення іонів важких металів, органічних забруднювачів та барвників.

Тоді можемо зазначити що ступінь мінералізації становить:

$$S = 100\% - A = 100\% - 5,3\% = 94,7\%$$

Чим менше сухої органіки і більше золи, тим вищий ступінь мінералізації.

Отже, хмічна структура верхового торфу характеризується низьким вмістом мінеральних речовин (зольність=5,3%) та високим вмістом органічної маси (ступінь розкладу= 94,7). Органічна частина багата на гумінові речовини та активні функціональні групи, зокрема карбоксильні (-COOH) та фенольні (-OH). Саме ці групи виступають основними сорбційними центрами, що забезпечують здатність вихідної сировини до іонообміну та хемосорбції катіонів, таких як Cu^{2+} та Ni^{2+}

3.2 Вплив активатора та температури термічної обробки на ефективність вилучення важких металів

Хімічна активація відіграє ключову роль у формуванні структурно-хімічних властивостей торф'яного сорбенту, оскільки тип активатора визначає характер дегідратації, ступінь деструкції органічної матриці, розвиток пористості та появу нових функціональних груп. У проведеному дослідженні були використані такі активатори: ортофосфатна кислота (15% і 30%), гідроксид калію (30%), суміш КОН із сіркою, хлорид цинку (30% і 50%) та суміш $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ з карбамідом. Візуальні та лабораторні спостереження дозволили встановити як спільні закономірності, так і суттєві відмінності між модифікованими зразками.

У ході експерименту було досліджено вплив хімічного складу реагентів та температур активації на ефективність сорбентів, отриманих із торфу, для вилучення іонів міді (Cu^{2+}) та нікелю (Ni^{2+}) з водного розчину. Вивчено низку зразків, отриманих при різних температурах (200°C, 300°C, 400°C) із використанням різних активуючих агентів: H_3PO_4 (30%), H_3PO_4 (15%), ZnCl_2 (50%), ZnCl_2 (30%), КОН (30%), КОН(30%) + S (15%), фосфат амонію з карбамідом (10%) (Таблиці 3.1-3.3)

Таблиця 3.1 – Результат титрування 200°C

ДЛЯ 200°C	Титрування- С(Cu 2+)				Титрування- С(Ni2+)			
Назва	pH	Сзал	%, вилучення	q,мг/г	pH	Сзал	%, вилучення	q,мг/г
(NH ₄) ₃ PO ₄ (10%) + CO(NH ₂) ₂ (10%)	3,8	72,504	30,28	1,5748	3,8	75,3	24,7	1,235
ZnCl ₂ (50%)	5,01	67,416	35,18	1,8292	5,01	70,16	29,84	1,492
ZnCl ₂ (30%)	5,09	20,352	80,43	4,1824	5,12	22,3	77,7	3,885
H ₃ PO ₄ (30%)	2,62	58,512	43,74	2,2744	2,65	60,2	39,8	1,99
H ₃ PO ₄ (15%)	2,74	38,16	63,31	3,292	2,8	40,5	59,5	2,975

Таблиця 3.2 – Результат титрування 300°C

ДЛЯ 300 °C	Титрування- С(Cu 2+)				Титрування- С(Ni2+)			
Назва	pH	Сзал	%, вилучення	q,мг/г	pH	Сзал	%, вилучення	q,мг/г
(NH ₄) ₃ PO ₄ (10%) + CO(NH ₂) ₂ (10%)	3,33	86,496	16,83	0,8752	3,4	85,37	14,63	0,7315
ZnCl ₂ (50%)	5,94	1,272	98,78	5,1364	5,99	2,2	97,8	4,89
ZnCl ₂ (30%)	5,16	0,636	99,39	5,1682	5,2	1,3	98,7	4,935
H ₃ PO ₄ (30%)	2,56	2,56	2,56	2,56	2,68	5	95	4,75
H ₃ PO ₄ (15%)	2,54	0	100	5,2	2,64	0,5	99,5	4,975

Таблиця 3.3 – Результат титрування 400°C

ДЛЯ 400 °C	Титрування- C(Cu 2+)				Титрування- C(Ni2+)			
Назва	pH	Сзал	%, вилучення	q,мг/г	pH	Сзал	%, вилучення	q,мг/ г
(NH ₄) ₃ PO ₄ (10%) + CO(NH ₂) ₂ (10%)	3,6	101,8	2,15	0,112	3,7	99,02	0,98	0,049
ZnCl ₂ (50%)	4,15	1,145	98,9	5,14276	4,16	3,15	96,85	4,842 5
ZnCl ₂ (30%)	4,96	8,268	92,05	4,7866	5,01	7,96	92,04	4,602
H ₃ PO ₄ (30%)	2,61	8,904	91,44	4,7548	2,64	9,01	90,99	4,549 5
H ₃ PO ₄ (15%)	2,7	1,7808	98,29	5,11096	2,72	2,6	97,4	4,87
KOH(30%)	6,69	31,8	69,42	3,61	6,72	34,6	65,4	3,27

У результаті проведених експериментів було отримано 16 ефективних зразків поліфункціональних сорбентів на основі торфу, які відрізнялися як умовами активації, так і використаними хімічними агентами. Основною метою було встановити, який із застосованих методів активації забезпечує найвищу ефективність вилучення іонів металів із водного середовища.

Активация ортофосфатною кислотою показала себе найбільш стабільним та керованим методом хімічної модифікації торфу. Після просочування та термообробки всі зразки характеризувалися однорідною структурою та повною відсутністю інтенсивного вилуговування гумінових сполук. Промивні розчини були прозорими, що свідчить про збереження цілісності органічної матриці. Фосфатні групи, які утворюються внаслідок реакції H₃PO₄ з компонентами торфу, сприяють появі додаткових активних центрів, здатних утворювати стабільні комплекси з іонами важких металів. Цей факт обумовлює підвищену сорбційну активність таких зразків.

Протилежний ефект спостерігався у зразків, активованих КОН. У цьому випадку промивні розчини набували характерного рудого забарвлення через

інтенсивне вилуговування гумінових речовин. Така деструкція органічної матриці є небажаною, оскільки призводить до втрати функціональних груп, що відповідають за сорбцію катіонів металів. Зразки демонстрували нестійку структуру, а в процесі подальших сорбційних випробувань могли додатково забарвлювати розчини. Таким чином, при активації КОН всі зразки були невдалими. (Рис 3.1)

Водночас використання КОН у поєднанні з елементарною сіркою забезпечило кращі результати, але лише при 400 °С було отримано якісний зразок. Сірка взаємодіє з органічними компонентами торфу та може формувати полісульфідні зв'язки, що підвищують сорбційну здатність матеріалу щодо міді та інших важких металів. Зразок, модифікованої сумішшю КОН+S, демонстрували темно-вуглецевий, але стабільний колір та не спричиняли інтенсивного забарвлення промивних вод. Проте ефективність вилучення є помірним.



Рис 3.1 – Невдалі спроби отримати сорбент, при активації з КОН та КОН+S

Хлорид цинку, незалежно від концентрації, проявив високу ефективність у формуванні мікропористої структури. ZnCl_2 відомий своєю здатністю дегідратувати біомасу та стимулювати утворення внутрішньої порової системи.

Зразки після активації ZnCl_2 були механічно стійкими, однорідними, а промивні розчини залишалися прозорими. Найбільш виражений розвиток пористості спостерігався у зразків, модифікованих 50%-м розчином ZnCl_2 .

Суміш $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ та $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ сприяла утворенню азотовмісних і фосфатних функціональних груп, що позитивно впливає на хемосорбційні процеси. Ці зразки зберігали стабільну структуру, не вилугували гумінових речовин та мали рівномірний ступінь карбонізації, але результат був досить помірним.

Температурний режим термообробки є другим, не менш важливим фактором, що визначає формування сорбційних властивостей торфу. У роботі розглядали три температурні рівні: 200, 300 та 400 °C, які охоплюють основні стадії термічного перетворення біомаси — від дегідратації до часткової карбонізації.

Обробка при 200 °C призводить переважно до видалення фізично зв'язаної та частини хімічно зв'язаної вологи. На цьому етапі структура торфу зберігається майже незмінною, не утворюється значна кількість пор, а функціональні групи залишаються практично недоторканими. Такий матеріал не має достатньо розвиненої поверхневої активності, але є стабільною основою для подальшої активації. Саме тому багато зразків були вологими і не готовими для сорбції. Згідно з експериментальними даними, ефективність вилучення Cu^{2+} у зразків, активованих за цієї температури, варіювала в широких межах — від 30,28 % до 80,43 %. Найкращий результат показав зразок, модифікований ZnCl_2 (30%), який продемонстрував $q = 4,1824$ мг/г, що є доволі високим показником для низькотемпературної активації.

Температура 300 °C виявилася оптимальною для часткової карбонізації. Саме при цьому режимі торф набуває більшої структурної стабільності, формується розгалужена система мезопор, при цьому зберігається значна кількість карбоксильних та фенольних груп. Матеріал, активований за такого температурного режиму, демонструє збалансоване поєднання мікро- і мезопористості, достатню механічну міцність та високу хімічну активність

поверхні незалежно від використання хімічного агента. Майже всі зразки, за винятком модифікації $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 + \text{CO}(\text{NH}_2)_2$, продемонстрували вилучення Cu^{2+} понад 98 %.

Особливо виділяються зразки, активовані ZnCl_2 (50%), ZnCl_2 (30%) та H_3PO_4 (15%), які показали майже повне видалення іонів міді (99,39–100 %) та максимальні значення сорбційної ємності ($q \approx 5,2$ мг/г).

При 400 °C відбувається глибока карбонізація й інтенсивне утворення мікропор. Хоча площа поверхні суттєво зростає, надто висока температура спричиняє часткову деструкцію оксигенвмісних функціональних груп, що знижує здатність до хемосорбції іонів металів. Це особливо характерно для лужних активаторів: зразок, модифікований КОН (30%), при 400 °C спричинив вилуговування гумінових речовин, що проявилось у забарвленні фільтрату в темний колір.

Для кислотних та фосфатних активаторів висока температура є прийнятною, однак загалом надмірна деструкція органіки знижує хемосорбційні можливості.

Отже, вплив температури є критичним і визначає баланс між розвитком пористості та збереженням функціональних груп, відповідальних за хемосорбцію іонів металів. Оптимальним для отримання стабільного та високоефективного сорбенту на основі торфу можна вважати температурний діапазон 300–400 °C.

3.3 Аналіз візуальних спостережень після термічної активації

Одним із перших візуальних показників ефективності та повноти очищення активованих зразків торфу від залишків реагентів є аналіз кольоровості промивних вод (фільтрату). За результатами всі зразки, які успішно пройшли хімічну активацію становили собою прозорі розчини (Рис 3.2), окрім КОН 30% (400°C). Лише КОН надав розчину рудий колір, що вказує на інтенсивне вилуговування гумінових речовин.



Рис 3.2 – Розчини після сорбції

3.4 Дослідження ізотерм та кінетики сорбції на модифікованому і немодифікованому торфі

Для кількісної оцінки адсорбційної здатності отриманих матеріалів та встановлення механізмів взаємодії між адсорбентом і адсорбатом було проведено дослідження рівноважної адсорбції з використанням ізотерм. Ізотермічний аналіз дозволяє встановити характер розподілу адсорбованої речовини між твердою фазою сорбенту та рідкою фазою розчину за сталої температури, а також оцінити енергію та ємність сорбційних центрів.

Для побудови ізотерм адсорбції як модельну сполуку було обрано метиленовий синій, що широко застосовується як стандартний адсорбат для оцінки поверхневих властивостей вуглецевмісних та природних сорбентів.

Дослідження проводили для двох матеріалів: немодифікованого верхового торфу та торфу, модифікованого 15%-м розчином ортофосфатної кислоти, який показав найкращі сорбційні характеристики у попередніх експериментах.

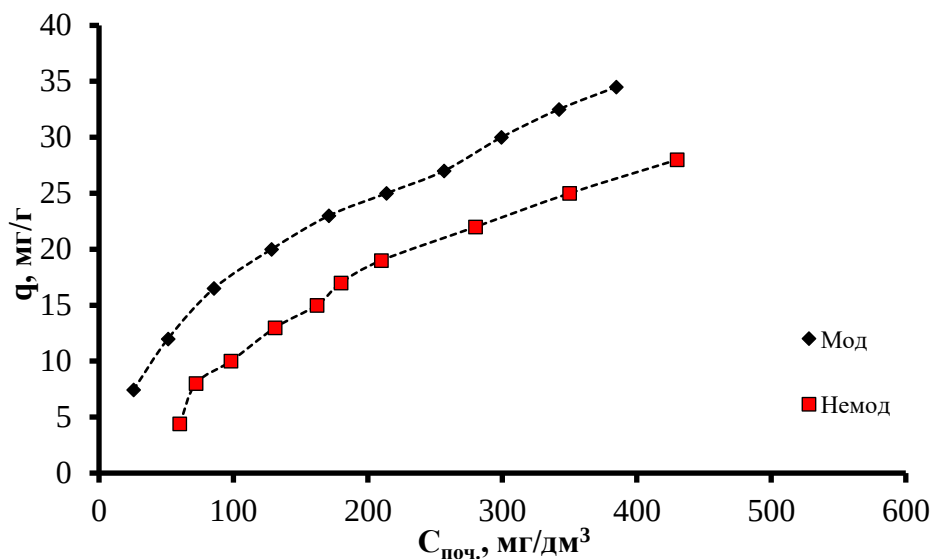


Рис. 3.3- Ізотерми сорбції метиленового синього на немодифікованому торфі та торфу оброблених розчином $\text{H}_3\text{PO}_4(15\%)$ для визначення питомої поверхні

Отримані експериментальні дані свідчать, що зі збільшенням рівноважної концентрації барвника у розчині сорбційна ємність зразків зростає, що пов'язано з поступовим заповненням активних центрів на поверхні сорбенту⁵. Для модифікованого торфу значення адсорбційної ємності є суттєво вищими порівняно з вихідним матеріалом у всьому діапазоні концентрацій (Рис. X- Ізотерми сорбції). Зокрема, максимальна сорбційна ємність досягає 36,1 мг/г для модифікованого сорбенту проти 27 мг/г для немодифікованого торфу. Це пояснюється збільшенням кількості доступних функціональних груп та розвитком пористої структури внаслідок кислотної активації.

Для оцінювання рівноважних характеристик адсорбції була застосована модель Ленгмюра (Рис 3.4), яка описує утворення мономолекулярного шару адсорбату на поверхні сорбенту.

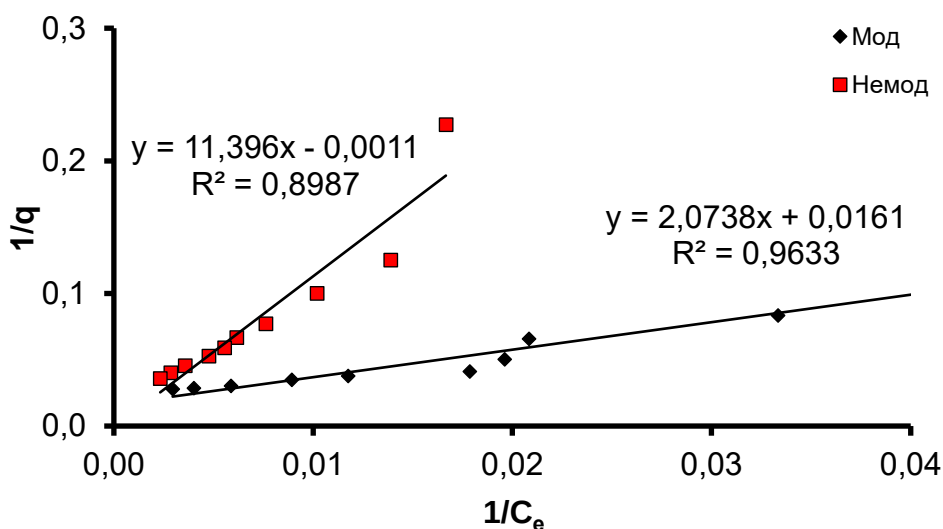


Рис 3.4 - Спрямлені ізоТЕРМИ адсорбції Cu^{2+} в координатах рівняння Ленгмюра

З отриманих даних видно, що активований торф має вищу адсорбційну здатність (його крива розташована нижче, що означає більші значення q). Вищий коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9633$ також свідчить про кращу відповідність експериментальних даних моделі Ленгмюра для активованого зразка. Це пояснюється збільшенням кількості активних центрів та розвитком пористості після кислотної обробки. Графік прямої Ленгмюра демонструє лінійну залежність, що вказує на утворення мономолекулярного шару та однорідність поверхні активованого торфу порівняно з вихідним матеріалом.

Для опису процесу адсорбції на поверхні з енергетично неоднорідними центрами застосовано модель Фрейндліха.

Лінеаризація цієї моделі (Рис. 3.5) показала, що коефіцієнт інтенсивності адсорбції (K^F для активованого зразка є суттєво вищим ($K^F=2,62$) порівняно з немодифікованим ($K^F=0,21$), що є прямим кількісним доказом його вищої адсорбційної здатності. Водночас, немодифікований торф має кращу відповідність цій моделі ($R^2 = 0,938$) порівняно з активованим ($R^2 = 0,8617$). Це свідчить про те, що адсорбція на вихідному матеріалі краще описується як

багатошарова на гетерогенній поверхні. Для обох зразків показник $1/n$ менше одиниці (0,465 та 0,8257 відповідно), що підтверджує сприятливий перебіг процесу адсорбції.

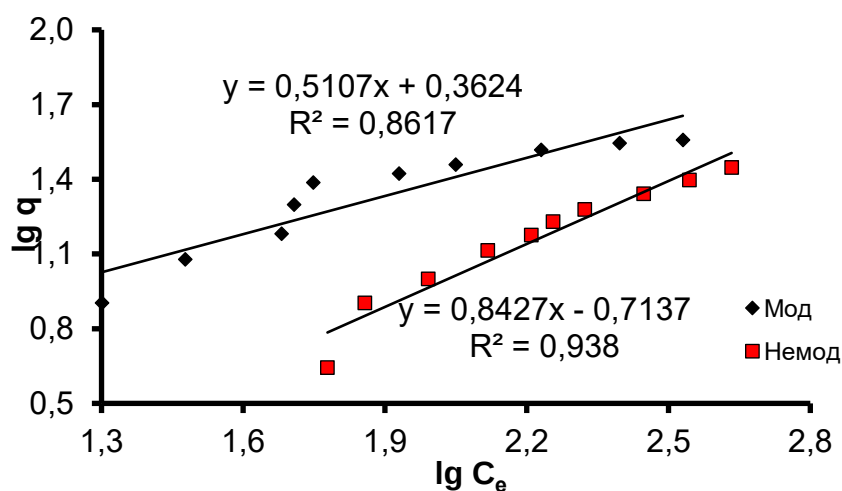


Рис 3.5 - Спрямлені ізотерми адсорбції Cu^{2+} в координатах рівняння Фрейндліха

Кінетичні дослідження адсорбції були проведені з метою встановлення швидкості процесу, часу досягнення рівноваги та визначення лімітуючих стадій взаємодії між іонами металу та сорбентом. Аналіз кінетики є важливим з практичної точки зору, оскільки дозволяє оцінити ефективність застосування сорбенту в реальних умовах очищення води.

Експериментальні дослідження кінетики адсорбції іонів Cu^{2+} проводили для немодифікованого торфу та торфу, активованого 15%-м розчином H_3PO_4 . Зміни концентрації іонів міді в розчині фіксували у визначені проміжки часу, після чого розраховували величину адсорбції q .

Отримані результати свідчать (Рис 3.6), що основна частина іонів міді адсорбується протягом перших 40–60 хвилин контакту фаз. Для модифікованого сорбенту характерна значно вища швидкість адсорбції, що зумовлено збільшенням кількості доступних активних центрів та покращеною дифузією іонів у пористу структуру матеріалу. Після 90–120 хвилин процес досягає стану

динамічної рівноваги, і подальше збільшення часу контакту не призводить до суттєвого зростання сорбційної ємності.

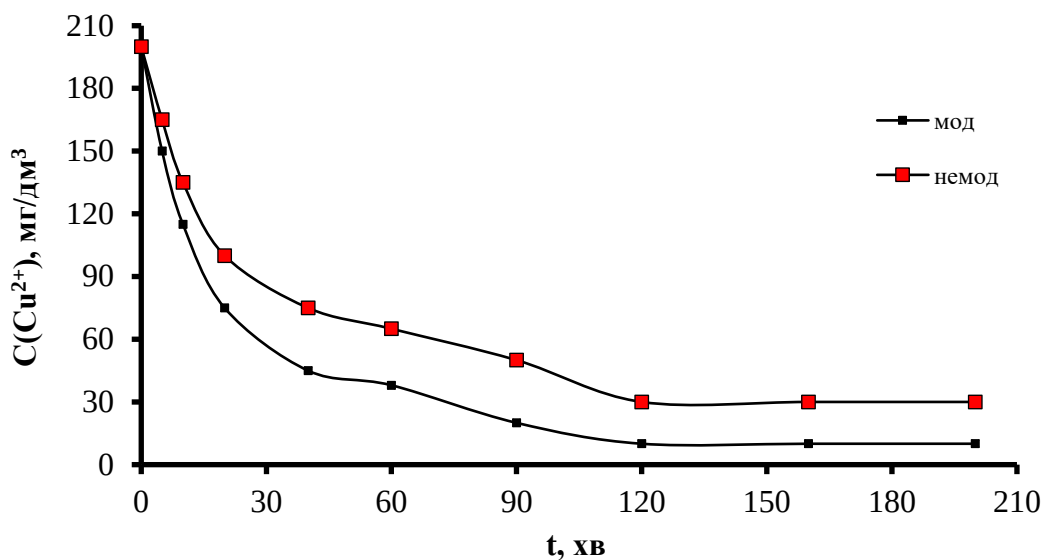


Рис 3.6 - Залежність залишкової концентрації Cu^{2+} від часу сорбції

Для встановлення механізму адсорбції експериментальні дані були проаналізовані за моделями псевдо-першого та псевдо-другого порядків.

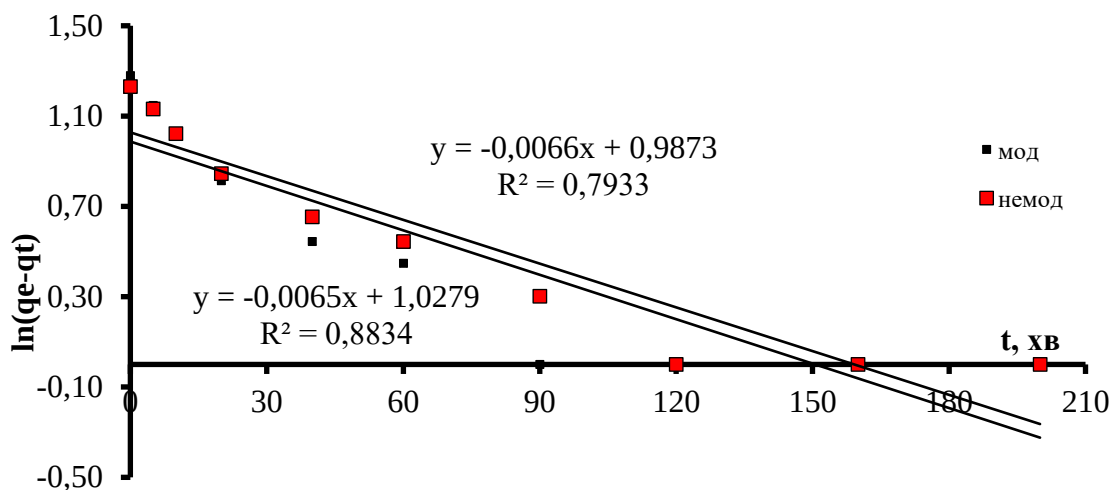


Рис 3.7 - Кінетична модель псевдо-першого порядку

Модель псевдо-першого порядку (Рис 3.7 - Кінетична модель псевдо-першого порядку) описує процеси, лімітовані дифузією або фізичною адсорбцією. Параметри цієї моделі демонструють низькі значення коефіцієнтів детермінації ($R^2 < 0,85$), що вказує на слабку кореляцію. Крім того, обчислені значення рівноважної ємності 9,4-9,7 мг/г критично відрізняються від експериментально визначених ($q_{e, \text{експ}}$ 17,0-19,0 мг/г). Таким чином, модель псевдо-першого порядку не описує механізм адсорбції іонів міді на торфі.

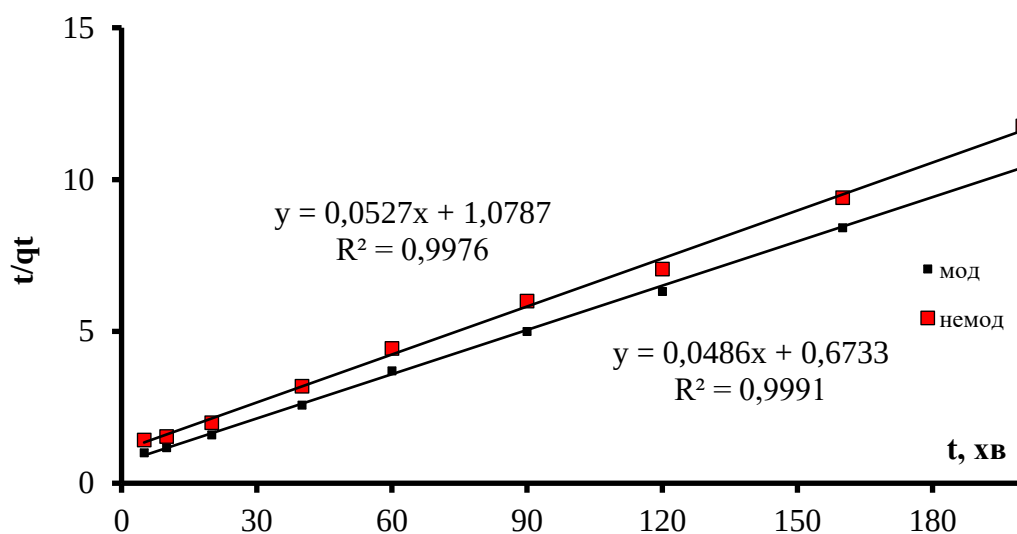


Рис 3.8 - Кінетична модель псевдо-другого порядку

Модель псевдо-другого порядку (Рис 3.8 - Кінетична модель псевдо-другого порядку) базується на припущенні, що швидкість процесу визначається хімічною взаємодією — хемосорбцією.

Ця модель виявилася найбільш адекватною для опису кінетики процесу адсорбції, що підтверджується надзвичайно високими значеннями коефіцієнтів детермінації ($R^2 > 0,99$) для обох зразків. Крім того, розраховані величини рівноважної ємності ($q_{e, \text{експ}}$) чудово узгоджуються з експериментальними значеннями $q_{e, \text{експ}}$. На графіках залежності q_t від t спостерігаються чіткі прямі лінії, що майже повністю збігаються з побудованою регресією.

Висока відповідність моделі псевдо-другого порядку дозволяє зробити висновок, що швидкість процесу адсорбції лімітується хемосорбційним механізмом, тобто сорбція іонів Cu^{2+} відбувається внаслідок хімічної взаємодії з функціональними групами торфу. Високі значення константи k_2 у активованого торфу вказують на швидше протікання цього процесу.

Це дозволяє зробити висновок, що швидкість процесу визначається хемосорбційним механізмом, що передбачає електронний обмін між сорбентом і адсорбованими іонами.

3.4 Утилізація відпрацьованого сорбенту після використання

Після успішного завершення сорбційних експериментів, де активований торф'яний матеріал продемонстрував свою здатність ефективно вилучати іони металів із водних розчинів, виникає критичне питання екологічно безпечного поводження з відпрацьованим сорбентом. Відпрацьований матеріал насичений важкими металами, що вимагає застосування спеціалізованих методів, які забезпечать або відновлення сорбенту, або надійну іммобілізацію забруднювача. Утилізація торф'яного сорбенту має значну перевагу завдяки його природній органічній основі, яка не створює додаткового хімічного забруднення, як це можуть робити синтетичні матеріали.

Першочерговим та найбільш економічно вигідним підходом є регенерація сорбенту з одночасною рекуперацією міді. Цей процес передбачає обробку насиченого матеріалу розчинами кислот (наприклад, HCl або H_2SO_4). Іони водню (H^+) ефективно витісняють іони Cu^{2+} із функціональних груп сорбенту, повертаючи мідь у висококонцентрований розчин — елюат. Після такої обробки сорбент відновлює свою активність і може бути використаний багаторазово, що значно знижує операційні витрати. Концентрований розчин міді (елюат), своєю чергою, може бути направлений на подальшу переробку, наприклад, для осадження або електролізу, з метою вилучення і рециклінгу чистого металу.

Якщо ж регенерація є недоцільною через малі об'єми або технічні обмеження, застосовують метод термічної утилізації. Завдяки високому вмісту вуглецю, торф'яний сорбент можна піддавати спалюванню або піролізу при високих температурах. У цьому процесі органічна основа торфу повністю руйнується, а поглинені іони металів переходять у хімічно стабільну форму — оксиди або силікати, які залишаються у твердому залишку — золі. Зола є менш реакційноздатною, ніж вихідний сорбент із сорбованим металом. Це дозволяє безпечно захоронювати її як інертний матеріал або використовувати у будівельній галузі, наприклад, як компонент для дорожнього покриття, забезпечуючи надійну іммобілізацію важкого металу.

Крім того, як альтернативний метод безпечної утилізації, насичений сорбент можна піддати хімічній іммобілізації. Це передбачає змішування матеріалу зі зв'язуючими речовинами (цементом, вапном) та подальше затвердіння. Така обробка максимально знижує рухливість іонів металів, запобігаючи їхньому вилугуванню у ґрунтові води, і дозволяє здійснити безпечне захоронення на спеціалізованих полігонах. Вибір конкретного методу утилізації залежить від концентрації забруднювача, обсягів матеріалу та місцевих екологічних нормативів, але у всіх випадках торф'яна основа забезпечує гнучкість у виборі екологічно відповідального рішення.

Висновок до розділу 3

1. Характеристика вихідної сировини . Встановлено, що використаний верховий торф характеризується високим вмістом органічної речовини, низькою зольністю та наявністю значної кількості кисневмісних функціональних груп (COOH , OH), що зумовлює його початкову сорбційну активність щодо іонів міді. Проте без додаткової обробки ефективність вилучення Cu^{2+} залишається обмеженою, що підтверджує доцільність хімічної та термічної модифікації.

2. Вплив хімічних активаторів на сорбційні властивості торфу. Показано, що тип хімічного активатора істотно впливає на формування пористої

структури та кількість активних центрів сорбції. Найвищі показники сорбційної здатності продемонстрували зразки, активовані розчинами H_3PO_4 , KOH та ZnCl_2 , що пояснюється розвитком мікро- та мезопористої структури і збільшенням кількості функціональних груп. Модифікація комбінованими активаторами (зокрема $\text{KOH} + \text{S}$, $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 + \text{CO}(\text{NH}_2)_2$) забезпечувала додаткову функціоналізацію поверхні та підвищення ступеня вилучення іонів міді до високих значень (понад 80–90 %) порівняно з немодифікованим торфом.

3. Вплив температури термічної обробки. Установлено, що підвищення температури карбонізації з 200 до 300–400 °C сприяє зростанню сорбційної ємності сорбентів за рахунок розвитку порової структури та активації поверхні. Водночас надмірне підвищення температури призводить до часткового руйнування функціональних груп органічної матриці торфу, що може знижувати селективність сорбції. Таким чином, оптимальний температурний діапазон термообробки забезпечує баланс між пористістю та хімічною активністю сорбенту.

4. Результати візуальних спостережень після термічної активації. Візуальний аналіз зразків після активації підтвердив перебіг процесів карбонізації: зміна кольору від бурого до темно-коричневого або чорного, зростання крихкості та зменшення об'ємної щільності. Найбільш структурно стабільні та однорідні зразки спостерігались після обробки при середніх та високих температурах, що корелює з їх підвищеною сорбційною активністю.

5. Ізотерма та кінетика адсорбції іонів Cu^{2+} . Дослідження ізотерм і кінетики адсорбції показало, що процес сорбції іонів міді є інтенсивним на початкових етапах контакту, а основна частина іонів Cu^{2+} вилучається протягом перших 30–60 хв. Це свідчить про наявність значної кількості доступних активних центрів на поверхні модифікованих сорбентів та ефективну взаємодію між сорбентом і катіонами металу. Отримані результати підтверджують перспективність використання модифікованого торфу для швидкого доочищення водних розчинів.

6. Екологічні аспекти та утилізація відпрацьованого сорбенту. Розглянуто можливі шляхи утилізації використаного торф'яного сорбенту, зокрема термічну утилізацію або використання у складі твердих композиційних матеріалів. Це свідчить про екологічну безпечність та ресурсоефективність запропонованого підходу, оскільки застосування природної сировини дозволяє мінімізувати утворення вторинних токсичних відходів.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що термохімічна модифікація верхового торфу суттєво підвищує його сорбційні властивості щодо іонів міді. Отримані сорбенти демонструють високий ступінь очищення водних розчинів, швидку кінетику адсорбції та екологічну доцільність застосування, що підтверджує перспективність їх використання у технологіях очищення стічних вод.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТ

4.1 Опис ідеї проєкту

В основу розроблення стартап-проєкту покладено створення та комерціалізацію технології виготовлення модифікованих сорбентів на основі верхового торфу для вилучення іонів важких металів з водних розчинів. Проєкт передбачає подвійний формат діяльності — продаж технології створення модифікованого сорбенту та реалізацію готового продукту для промислових підприємств, що займаються очищенням стічних вод.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Використання модифікованих торф'яних сорбентів для вилучення важких металів з водних розчинів	1. Підприємства водоочистки	Висока ефективність очистки
	2. Гальванічні цехи	Простота у використанні
	3. Хімічні та машинобудівні підприємства	Зниження витрат на утилізацію
	4. Науково-дослідні лабораторії	Інноваційність та універсальність застосування

Назва стартапу «Modisorb» лого представлено на рисунку 4.1.



Рис 4.1 – емблема стартапу «Modisorb»

Далі, після опису ідеї стартап-проекту проводиться аналіз техніко-економічних переваг ідеї. Незважаючи на те, що на ринку вже існують традиційні сорбенти (активоване вугілля, синтетичні цеоліти), торф'яний сорбент має низку критичних переваг, які дозволяють йому зайняти конкурентну нішу.

Рицця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент : Екософт.	Конкурент : ТОВ «HydroClean Technologies»	Конкурент: ТОВ «BWT Україна »			
1.	Собівартість	5500 грн/ тонну	7500 грн/ тонну	8000 грн/ тонну	9000 грн/ тонну			+
2.	Ступінь очистки від	96-98%	85-90%	90-93%	92-95%			+

	важких металів							
3.	Термін експлуатації	Середній	Середній	Високий	Високий	+		
4.	Вартість і технічність утилізації	Низька, проста (екоспалювання, добрива після детоксикації)	Висока, потребує спецутилізації	Середня	Висока, токсичні залишки			+
5.	Транспортування	Стандартне	Стандартне	Стандартне	Ускладнене (чутливість до вологості)		+	
6.	Безпечність використання	Висока	Середня (вуглещевий пил)	Середня	Середня (хімічні реагенти)			+

Сильні сторони проєкту:

- Низька собівартість виробництва сорбенту — 5500 грн/т, що є нижчим показником порівняно з аналогами (7500–9000 грн/т).
- Висока ефективність вилучення іонів важких металів — 96–98 %, що перевищує показники конкурентів.
- Екологічно безпечна утилізація — можливість спалювання або використання як ґрунтополіпшувача після детоксикації.

- Безпечність використання для персоналу — природна сировина не створює токсичних відходів, не потребує спеціальної утилізації чи користування засобами посиленої хімічної безпеки.

Слабкі сторони проєкту:

- Середній термін експлуатації, який є нижчим порівняно з деякими конкурентними продуктами (наприклад, іонообмінними смолами).
- Необхідність підтвердження ефективності на промислових об'єктах, оскільки продукт є новим для ринку.
- Відсутність сформованого бренду, що знижує рівень первинної довіри клієнтів у консервативному B2B-сегменті.

4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

У межах цього підрозділу було здійснено аналіз технологічного аспекту реалізації ідеї проєкту, тобто дослідження технології, за допомогою якої може бути виготовлений запропонований продукт (модифікований торф'яний сорбент). Аналіз можемо спостерігати в таблиці 4.3

Таблиця 4.2 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Сорбційні властивості торфу покращуються хімічною модифікацією (наприклад, $ZnCl_2$ – 50% або	Сорбент отримували, попереднього зневодивши торф, обробляючи кислотами, лугами та	Розробка нового виду сорбенту	Доступні авторам(лабораторне обладнання, стандартні хімічні реагенти).

	іншими реагентами) для збільшення кількості функціональних груп.	солями металів із подальшою термообробкою та відмиванням сорбенту від залишків модифікаторів водою до прозорості. Після цього сорбент висушували на повітрі.		
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Розробка модифікованого поліфункціонального сорбенту на основі верхівного торфуг				

На основі проведеного технологічного аудиту встановлено, що реалізація проекту з використання модифікованих сорбентів на основі торфуг для вилучення важких металів з водних розчинів є технологічно здійсненою. Існуючі ринкові технології з модифікації природних сорбентів, зокрема методи хімічної, термічної та біологічної обробки торфуг, забезпечують можливість впровадження проекту без значних технологічних бар'єрів.

Запропонована технологія передбачає вибір сучасного лабораторного та виробничого обладнання, що дозволяє ефективно проводити процеси активації, сушіння та грануляції торф'яного матеріалу, а також його модифікацію за допомогою екологічно безпечних реагентів. Для повної інтеграції у виробничий цикл може знадобитися незначна адаптація систем автоматизації та контролю якості очищеної води.

Проект може бути реалізований завдяки доступності необхідних технологій і сировинної бази, що підтверджує його високу ймовірність успішної реалізації та масштабування у промислових умовах.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

1) Попередня характеристика потенційного ринку

Потенційний ринок стартап-проекту – це промисловий сектор водоочищення, що є високорегульованим і чутливим до вартості, але з високими вимогами до ефективності

Таблиця 3.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	5 000 000 грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Конкурентність, сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Вимоги згідно ДСТУ 3041-95 "Система стандартів у галузі охорони навколишнього середовища»
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	60%

Загальний обсяг ринку очисних матеріалів є значним. Наш продукт займає нішу екологічних, але високоефективних сорбентів, яка наразі недостатньо насичена. Висока норма рентабельності в галузі свідчить про те, що клієнти готові платити за якісні та надійні рішення, особливо ті, які допомагають уникнути штрафів за порушення екологічних нормативів. Наш сорбент, завдяки низькій собівартості, дозволяє пропонувати клієнтам вигідне співвідношення ціна/якість.

2) Характеристика потенційних клієнтів

Цільова аудиторія – це промислові підприємства, для яких скидання стічних вод із високим вмістом важких металів є щоденною проблемою, що вимагає постійних операційних витрат та контролю.

Таблиця 4.4 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Ефективне та екологічно безпечне очищення води від важких металів з мінімальними операційними витратами	Гальванічні цехи, підприємства хімічної та машинобудівної промисловості, ТЕЦ, гірничодобувна промисловість.	1)вартість; 2)доступність; 3)простота у використанні. 4)безпечність	Ефективність (очищення до ГДК), Низька ціна, Наявність сертифікатів, Простота інтеграції у існуючу систему фільтрації.

Клієнти з сегменту B2B (Business-to-Business) приймають рішення на основі технічної доцільності та економічної вигоди. Їм потрібні не просто обіцянки, а чіткі протоколи випробувань, що підтверджують здатність сорбенту очищати воду до необхідних гранично допустимих концентрацій (ГДК). Оскільки екологічні нормативи постійно посилюються, зростає попит на рішення, які не тільки виконують поточні вимоги, але й мають потенціал для адаптації до майбутніх змін. Наш модифікований сорбент ідеально відповідає цим вимогам, оскільки його ефективність була цілеспрямовано підвищена.

3) Після проводять аналіз зовнішнього середовища, що дозволяє визначити ключові зовнішні фактори (можливості та загрози), які можуть вплинути на комерційний успіх проєкту.

Таблиця 4.5 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Вихід на ринок більш ефективного або дешевого товару-замінника	Поява нових, вискоєфективних наносорбентів або дуже дешевих аналогів.	Постійне дослідження та вдосконалення технології модифікації для покращення сорбційних властивостей
Зміна нормативів у галузі водоочистки	Жорсткість нормативів гранично допустимих концентрацій (ГДК).	Оперативний моніторинг нормативів та можливість швидкої адаптації технології.
Логістичні ризики	Можливі перебої з постачанням якісного торфу через сезонні чи інші фактори.	Створення стратегічних запасів сировини та диверсифікація постачальників торфу.

Ризики війни та її впливу на інші сфери життя	Проблеми з енергопостачанням через відключення, проблеми з робочою силою через мобілізацію, небезпека для виробничих потужностей через обстріли.	Перехід на альтернативні види енергії(генератори, зелені види енергії), розширення рекрутингової кампанії, релокейт потужностей до безпечніших регіонів.
---	--	--

Таблиця 4.6 – Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Екологічний тренд	Зростання попиту на екологічні, біорозкладні сорбенти на противагу синтетичним.	Активне позиціонування продукту як "зеленої" технології; отримання екологічних сертифікатів.
Науковий прогрес	Розвиток науки про модифікацію природних сорбентів.	Співпраця з науковими установами та ліцензування нових технологій.
Вихід на міжнародний ринок	Міжнародний попит на дешеві та ефективні сорбенти для промислових стоків, особливо в країнах ЄС, де цінують біо-продукти.	Сертифікація за міжнародними стандартами (ISO) та пошук міжнародних партнерів/дистриб'юторів.
Фактор війни	Потреба в додатковій портативній очистці	Випуск портативних продуктів для очистки

	води, через проблеми в регіонах бойових дій або де є проблеми з водопостачанням.	води в польових умовах та умовах де немає доступу до питної води.
--	--	---

4) Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Конкурентне середовище визначається не лише прямими конкурентами, а й товарно-видовими та функціональними замінниками. Наш продукт займає нішу між дорогими іонообмінними смолами та менш ефективним активованим вугіллям.

Таблиця 4.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Монополістична конкуренція (велика кількість схожих, але не ідентичних сорбентів).	На ринку присутня значна кількість виробників різних типів сорбентів: активоване вугілля (Ecosoft), синтетичні цеоліти (HydroClean), іонообмінні смоли (BWT Україна). Товари схожі за функцією, але не ідентичні за технологією та властивостями.	Нашою головною конкурентною перевагою є унікальне поєднання ціни, ефективності та екологічності.

Товарно-видова (іонообмінні смоли, активоване вугілля, синтетичні цеоліти).	Конкурентами є продукти, що виконують аналогічну функцію — очищення води від важких металів: активоване вугілля, смоли, цеоліти, реагентні методи.	Підприємство фокусується на перевагах: низька ціна і селективність, порівняно з дорогими іонообмінними смолами.
Цінова та нецінова (якість/ефективність) .	Підприємства обирають продукт не тільки за ціною, а й за ефективністю, екологічністю, безпечністю та зручністю застосування.	Ключовим є доведена ефективність (протоколи випробувань), що дозволяє виправдати ціну, вищу за вугілля.
В чому проявляється дана характеристика	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Прямі продажі від виробників, дистриб'ютори хімічних реагентів, постачальники очисного обладнання.	Основні конкуренти працюють через власних менеджерів B2B та через великі компанії- дистриб'ютори хімічної продукції.	Необхідно налагодити власну пряму систему збуту (B2B) з технічними консультантами, оскільки продукт є інноваційним та вимагає пояснень.
Конкуренція з вітчизняними та іноземними	На ринок впливають як українські виробники, так і імпортери	Фокус на місцевій сировині (торф) дає

виробниками сорбентів.	іноземних сорбентів (BWT, Purolite, Lewatit).	логістичну перевагу та знижує собівартість. ³
------------------------	---	--

5) а) Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Модель п'яти сил Майкла Портера допомагає оцінити загальну привабливість галузі та силу, з якою доведеться зіткнутися стартапу.

Таблиця 4.8 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу:	Це виробники традиційних сорбентів (активоване вугілля) та компанії, що постачають хімічні реагенти для очищення. Вони мають велику частку ринку, але наш продукт	Виробники хімічних реагентів та іонообмінних смол, традиційних сорбентів	Сировина (торф) є доступною, внутрішньою, що знижує залежність від імпорту та ризики. Основна залежність – від постачальників хімічних	Клієнти(підприємства, які містять важкі метали в своїх стоках) є вимогливими, чутливими до ціни та мають великий вибір.	Існують функціональні замінники (іонообмінні смоли, електрохімічні та реагентні методи очищення), які добре відомі на ринку.

	займає вузьку нішу.		модифікації орів.		
Висновки:	Необхідно уникати прямої цінової конкуренції, акцентуючи на селективності та екологічності.	Є можливість виходу на ринок, Перевагами є унікальність для українського ринку. Важливим є створення патенту.	Потрібна диверсифікація постачальників торфу для забезпечення стабільної якості та укладання довгострокових контрактів на хімічні реагенти.	Необхідно пропонувати індивідуальні рішення (технічний супровід) та доводити економічну вигоду через пілотні випробування.	Наш продукт виграє за вартістю експлуатації та утилізації, що є нашим ключовим диференціалом порівняно з дорогими смолами та складними реагентними методами.

Аналіз конкурентної ситуації засвідчив високий потенціал для успішного існування стартап-проєкту. Конкурентоспроможність продукту забезпечується поєднанням трьох стратегічно важливих характеристик: низька ціна, доведена висока ефективність вилучення важких металів та вузька спеціалізація на цільовому споживачі.

Для ефективного позиціонування модифікованого торф'яного сорбенту необхідно чітко розуміти, які сильні сторони мають наші основні конкуренти. Основними конкурентами в галузі водоочищення є виробники активованого вугілля (Традиційний сорбент) та іонообмінних смол (Синтетичний сорбент).

Аналіз їхніх переваг дозволяє визначити, як найкраще диференціювати наш продукт.

Таблиця 4.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п		Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.		Тип сорбенту, який використовується	Різні типи сорбентів мають різну вартість, екологічність, доступність та здатність працювати у різних умовах рН. Тому вибір типу сорбенту є ключовим при порівнянні альтернатив.
2.		Універсальність та селективність	Висока універсальність/селективність дозволяє знизити витрати, забезпечити стабільність очищення та відповідність нормативам. Це важливий критерій для промислових клієнтів з різними технологічними процесами.
3.		Екологічність та можливість утилізації	Вартість та складність утилізації впливають на загальні експлуатаційні витрати. Екологічність також важлива для проходження екологічних

			перевірок та участі в «зелених» тендерах.
4.		Економічна доцільність (вартість впровадження та експлуатації)	Економічна доцільність — один із ключових вирішальних факторів у B2B сегменті. Навіть ефективні продукти можуть бути відкинуті, якщо загальна вартість володіння є зовеликою.
5.		Репутація бренду та наявність промислових референсів	Новий бренд змушений доводити ефективність, що збільшує тривалість циклу закупівлі.
6.		Технологічна сумісність із наявним обладнанням	У випадку необхідності зміни обладнання клієнт відмовляється від нового продукту через додаткові витрати та ризики.

6) Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

Проведений порівняльний аналіз нашого сорбенту з ключовими аналогами (наприклад, активованим вугіллям) за найважливішими для клієнта факторами. Шкала оцінки від 1 до 20 визначає важливість фактора, а рейтинг від -3 до +3 — перевагу або недолік.

Таблиця 4.10 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з активованим вугіллям для вилучення важких металів

			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Тип сорбенту, який використовується (ефективність адсорбції)	20				C	A, B		
2.	Універсальність та селективність	18				C	A	B	
3.	Екологічність та утилізація	15				A	C	B	
4.	Економічна доцільність	19		A		<u>C</u>	B		
5.	Репутація бренду та наявність промислових референсів	18	B	A, C					
6.	Технологічна сумісність із наявним обладнанням	13				A, B, C			

A-Ecosoft;

B – BWT;

C-HydroClean Technologies

Проект має сильні сторони, такі як:

- низька собівартість виробництва ;
- висока ефективність адсорбції ;
- екологічно безпечна утилізація (краща за B і C);
- безпечність використання;
- економічна доцільність.

Слабкі сторони:

- слабша репутація бренду ;
- коротший термін експлуатації ;
- потреба у додатковому підтвердженні ефективності у промислових умовах (через новизну продукту).

7) SWOT-аналіз та управлінська проблема

Комплексний аналіз внутрішніх та зовнішніх факторів дозволяє сформулювати ключову управлінську проблему.

Таблиця 4.12 – Формулювання управлінської проблеми. SWOT-аналіз.

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
- Низька собівартість сировини (торф). - Висока ефективність вилучення важких металів - Екологічно безпечна утилізація (спалювання або добрива після детоксикації). - Безпечність використання (природна сировина). - Економічна доцільність (кращий баланс ціна/якість)	- Новий, невідомий на ринку бренд. - Необхідність тривалого тестування на підприємствах клієнтів. - Обмежена клієнтська база на початку. - Середній термін експлуатації (гірший за синтетичні смоли).
Можливості :	Загрози:
- Зростання екологічної свідомості та посилення нормативів. - Можливість отримання "зелених" грантів та фінансування. - Вихід на міжнародний ринок.	- Висока конкуренція у галузі очистки. - Недостатність початкового фінансування. - Скептицизм технічних фахівців щодо біо-сорбентів.

8) На основі проведеного SWOT-аналізу та ідентифікованої управлінської проблеми (необхідність довести ефективність існуючому на ринку скепсису та забезпечити довіру) розробляються альтернативні стратегії ринкової поведінки

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1. Пошук кваліфікованих кадрів	Середня	1-6 місяців
2. Вигідні контракти з постачальниками сировини	Середнє	1-2 роки
3. Навчання не кваліфікованого персоналу	Висока	1-2 років
4. Стратегія масового маркетингу	Середня /Низька (потребує великого фінансування на маркетинг).	6-12 місяців
5. Стратегія нішевого лідерства через науковий референс	Висока	6–12 місяців
6. Вихід на міжнародні ринки через участь у грантових програмах та інкубаторах (EIT Climate, Horizon, USAID, GEF)	Середня	1–3 роки
7. Комерціалізація технології через	Низька	2–4 роки

продаж патенту/ноу- хау		
----------------------------	--	--

На основі аналізу альтернатив, представлених у Таблиці 4.13, обґрунтовується вибір найбільш доцільної стратегії для виведення модифікованого торф'яного сорбенту на ринок. Обрана альтернатива : Стратегія нішевого лідерства через науковий референс (Співпраця з 1-2 великими підприємствами для пілотних випробувань та публікації результатів, отримання сертифікатів ISO та ДСТУ) . Так як у B2B-сегменті фінансування (наприклад, інвестиції, гранти) легше залучається під конкретні договори та пілотні проєкти, які підтверджують ефективність, ніж під абстрактну масштабну маркетингову кампанію. Наш екологічний інноваційний продукт має високі шанси на отримання "зелених" грантів. Отримання офіційного референсу та протоколів випробувань є найшвидшим шляхом до формування довіри. Це прямий і найефективніший спосіб подолання Управлінської проблеми (слабка сторона W1 – невідомий бренд) порівняно з тривалими та дорогими процесами, необхідними для інших стратегій.

Таким чином, Стратегія нішевого лідерства через науковий референс дозволяє найшвидше перетворити ключову слабку сторону проєкту (невідомість бренду та скептицизм клієнтів) на сильну перевагу (доведена ефективність, підтверджена промисловими партнерами).

4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

1) Вибір цільових груп (сегментів) потенційних споживачів є критично важливим для фокусування маркетингових зусиль проєкту. Цільові сегменти вибираються на основі результатів сегментування ринку та оцінки їхньої привабливості (потреба у продукті, розмір, доступність).

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Потенційними споживачами продукту є промислові підприємства, що генерують стічні води з іонами важких металів (наприклад, гальванічні виробництва), а також приватні споживачі, що використовують забруднену важкими металами артезіанську воду для	Ефективний вихід на ринок передбачає глибинний аналіз поведінки споживачів у сегменті водоочищення. Необхідно дослідити фактори, що визначають рішення про купівлю: пріоритетність ціни, ефективності, бренду та екологічності. Для оцінки	Попит формується регулярно потребою промислових підприємств (зокрема гальванічних виробництв) через необхідність дотримання екологічних нормативів. Канали збуту — прямі договори та тендерні майданчики..	Інтенсивність конкурентної боротьби у галузі очищення водних розчинів від важких металів визначається ефективністю використання інструментів впливу, як-от цінова політика, якість продукту, рівень сервісу та інноваційність. Оскільки висока	Вхід на ринок ускладнений, але інноваційність модифіковано го сорбенту (заощадження, екологічність) є його конкурентною перевагою. Для подолання бар'єрів входу доцільно фокусуватися на нових підприємствах або тих, що проходять модернізацію та відкриті до впровадження

побутових потреб	готовності ринку до нового сорбенту доцільно провести маркетингов е опитування.		конкуренція знижує середню рентабельність, критично важливим етапом є чітке визначення та підтвердження основної конкурентної переваги модифікованог о сорбенту на основі торфу.	інноваційних рішень.
Які цільові групи обрано: Промислові підприємства, що генерують стічні води з іонами важких металів, а також приватні споживачі.				

За результатами аналізу доцільно обрати стратегію концентрованого маркетингу, зосередившись на промислових підприємствах та комунальних службах, які мають найбільшу потребу в технологіях очищення від іонів важких металів.

2) Визначення базової стратегії розвитку.

На основі аналізу ринку та конкурентних переваг визначено, що продукт є інноваційним екологічним рішенням, орієнтованим на зниження шкідливого впливу промислових викидів.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Виробництво та впровадження модифікованих торф'яних сорбентів для очищення промислових і стічних вод	Концентрований маркетинг	Висока ефективність вилучення іонів важких металів, екологічність, доступна собівартість	Стратегія диференціації

Обрана стратегія диференціації є оптимальною для проєкту, оскільки модифікований торф'яний сорбент має унікальні властивості — високу ефективність вилучення важких металів, екологічність та низьку собівартість.

Це дозволяє виділитися серед конкурентів (активоване вугілля, цеоліти) не за ціною, а за цінністю продукту для споживача.

Стратегія спрямована на формування позитивного іміджу інноваційного, природного та економічно вигідного рішення для очищення води, що забезпечує стійку конкурентну перевагу на ринку.

3) Визначення стратегії конкурентної поведінки

Враховуючи, що на ринку вже присутні аналоги (активоване вугілля, цеоліти, іонообмінні смоли), проєкт не є першопрохідцем, однак пропонує унікальні властивості продукту — природне походження, можливість регенерації та низьку собівартість. Це дозволяє застосувати стратегію наслідування лідеру з елементами вдосконалення якості.

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Шукатиме нових споживачів у сегментах промислового водоочищення	Так, базові характеристики ефективності, але з покращенням екологічності та вартості	Стратегія наслідування лідера з диференціацією

4) Визначення стратегії позиціонування

На основі вимог споживачів і вибраних стратегій сформовано таблицю 4.17.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспр оможні позиції власного стартап- проєкту	Вибір асоціацій, що формують ринкову позицію
--	--	---	---

- Висока ефективність очищення води від важких металів; - Екологічна безпечність продукту; - Економічна вигідність експлуатації	Стратегія диференціації	- Модифікована структура сорбенту, що забезпечує підвищену сорбційну здатність; - Використання природного торфу без токсичних добавок; - Низька собівартість виробництва та можливість регенерації	-Ефективність, надійність, інноваційність; - Природність, екологічність, сталість; - Доступність, практичність, економічність
---	-------------------------	--	---

Розроблена ринкова стратегія передбачає впровадження інноваційного, екологічно безпечного та економічно вигідного сорбенту для очищення промислових і стічних вод.

Проект зосереджується на сегменті підприємств, які прагнуть знизити рівень забруднення важкими металами та дотриматися екологічних норм.

Обрана стратегія диференціації та наслідування лідеру дозволить швидше увійти на ринок, забезпечити впізнаваність продукту і створити позитивний імідж бренду як ефективного та сталого рішення у сфері водоочищення.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

1) Визначення ключових переваг потенційного товару створює основу для формування цілісної концепції продукту та подальшої розробки маркетингової програми стартап-проєкту. Зведені результати дозволяють чітко окреслити, які вигоди отримує цільовий споживач та які конкурентні переваги необхідно підсилити в процесі виходу на ринок. Наступним етапом є деталізація товару за трирівневою моделлю, що дає змогу систематизувати сприйняття продукту з боку споживачів.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.Необхідність ефективного очищення промислових і стічних вод від іонів важких металів	Забезпечення високого ступеня очищення (до 95–98 %) завдяки модифікованій структурі торф'яного сорбенту	Вища ефективність порівняно з активованим вугіллям і природними цеолітами; стабільність роботи в широкому діапазоні рН
2. Потреба у зниженні витрат на очищення води	Низька собівартість сировини (торф), можливість багаторазового використання сорбенту	Економічна доцільність, зменшення витрат підприємств на очищення на 20–30 %
3. Зростання екологічних вимог до	Екологічно безпечний природний продукт без	Відповідність стандартам екологічної безпеки, перевага у

виробництва	токсичних компонентів	тендерах екологічно орієнтованих компаній
4. Потреба у простих і доступних технологіях очищення	Простота застосування, відсутність потреби у складному обладнанні	Просте впровадження у діючі системи очищення без додаткових витрат

2) Узагальнення товару за трирівневою моделлю забезпечує комплексне розуміння того, який саме продукт отримує клієнт: від базової функції очищення води до розширених сервісних характеристик, що підвищують його практичну цінність. Сформована модель дозволяє позиціонувати товар не лише як сорбент, а як ефективне, екологічне та економічно обґрунтоване рішення для підприємств.

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Товар призначений для очищення води підприємств від важких металів.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Екологічний сорбент із торфу.		
	2. Даний процес безпечний для споживача та для навколишнього середовища.		
	3. Висока сорбційна ємність та селективність до цільових металів		
	Даний сорбент мав тестовий варіант, перед запуском виробництва.		
	Пакування – стандартне.		

	Сорбент для вилучення іонів важких металів
III. Товар із підкріпленням	До продажу – Сорбент для вилучення іонів важких металів.
	Після продажу – Сорбент для вилучення іонів важких металів/
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патентування.	

3) Наступним кроком є визначення меж ціноутворення, що дасть змогу сформувати конкурентоспроможну цінову стратегію.

Таблиця 4.20 - Аналіз меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня межа ціни на товар/послугу	Нижня ціна на товар/послугу
Методи хімічного осадження (оцінка витрат на обробку 3500–4500 грн/тонну)	Традиційні сорбенти (активоване вугілля, цеоліти), наприклад, конкурент Екософт – 7500 грн/тонну	Великі та середні промислові підприємства (B2B сегмент): водоочистки, гальванічні цехи, хімічні підприємства	7000–7500 грн/тонну	5500–6050 грн/тонну (Собівартість 5500 грн/тонну + мінімальна націнка)

4) Отримані результати аналізу меж ціноутворення дозволяють встановити економічно обґрунтовану ціну, яка відповідає ринковим умовам, рівню доходів цільових клієнтів та характеристикам альтернативних товарів. Це забезпечує оптимальне позиціонування продукту на ринку та підвищує ймовірність його

успішного впровадження. Подальшим елементом маркетингової програми є визначення оптимальної системи збуту.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Клієнти – великі та середні промислові підприємства (хімічна, гальванічна промисловість). Вони вимагають документального підтвердження переваг сорбенту перед аналогами (активованим вугіллям).	Оскільки продукт є новим та інноваційним, стартап повинен забезпечити повний цикл впровадження: від аудиту системи очищення клієнта до поставки та контролю перших партій сорбенту. Це мінімізує ризики для клієнт	Необхідність збереження контролю над якістю технічної підтримки та забезпечення високої маржинальності. Уникнення складних, багатоланкових каналів, які можуть розмити експертну цінність.	Прямий збут дозволяє ефективно просувати інноваційну технологію. Дистриб'ютори забезпечують швидке охоплення широкого ринку без великих власних інвестицій у логістику.

5) Застосування оптимальної системи збуту сприятиме мінімізації логістичних витрат, збільшенню охоплення ринку та поліпшенню взаємодії зі споживачами. Обрана модель збуту забезпечує високу доступність продукту та дозволяє врахувати особливості закупівельної поведінки промислових клієнтів. Завершальним етапом є розроблення концепції маркетингових комунікацій, яка

забезпечить ефективне доведення ключових переваг продукту до цільової аудиторії.

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1. Потреба у технічній надійності та дотриманні екологічних стандартів.	Спеціалізовані галузеві виставки ("Екологія, "Хімпром"), наукові публікації та технічні звіти.	Висока ефективність вилучення важких металів (селективність), інноваційна технологія модифікації природного матеріалу (торфу).	Інформування про технічні переваги та доведення ефективності результатами лабораторних і промислових тестів..	«Максимальне очищення: Інновація, перевірена наукою, — торф'яний сорбент»
2. Потреба в економічній вигоді та зниженні витрат на експлуатацію.	Прямий B2B-маркетинг (персоналізовані комерційні пропозиції), власний сайт із розділом	Низька собівартість сировини, потенційна можливість вторинного використання відпрацьованог	Стимулювання збуту через демонстрацію фінансової доцільності (зниження витрат на	"Екологія + Економія: Ваші витрати на очищення перетворюються на нову сировину"

	"Розрахунок вигоди".	о сорбенту (як добрива).	утилізацію та сировину на 20-30%).	
3.Потреба у безпечному та простому впровадженні технології.	Прямі переговори з керівництвом та інженерами, вебінари для технічних спеціалістів, навчальні матеріали.	Екологічна безпека (нетоксичність), простота застосування та інтеграції у існуючі системи очищення.	Формування довіри та мінімізація бар'єрів для впровадження нової технології.	"Легка інтеграція, чистий результат: безпечна технологія, що не вимагає заміни обладнання"

Розроблена концепція маркетингових комунікацій забезпечує комплексне охоплення ключових груп цільових клієнтів та відповідає їхнім основним потребам — технічній надійності, економічній вигоді та простоті впровадження технології.

Обрані канали комунікацій (галузеві виставки, технічні публікації, прямі B2B-переговори, персоналізовані пропозиції, вебінари) дозволяють ефективно довести переваги сорбенту та адаптувати повідомлення під різні сегменти споживачів.

Запропоновані ключові позиції та рекламні меседжі формують цілісний образ продукту як інноваційного, високоефективного, екологічного та економічно доцільного рішення для очищення води.

Таким чином, концепція комунікацій повністю відповідає вибраній стратегії диференціації та сприяє формуванню довіри до нового бренду на ринку B2B-водоочистки.

Висновки до розділу 4

У результаті виконаного дослідження та розроблення маркетингової програми стартап-проєкту можна зробити такі висновки:

1. Ринкова комерціалізація проєкту є високою. Проведений аналіз свідчить про значний попит на ефективні та екологічно безпечні технології очищення промислових і стічних вод. Підприємства водоочистки, гальванічні цехи та хімічні виробництва демонструють стійку потребу в сорбентах з високими показниками вилучення іонів важких металів.

2. Переваги продукту забезпечують конкурентоспроможність. Модифікований торф'яний сорбент має низку критичних переваг: висока ефективність очищення, природність та екобезпечність сировини, низька собівартість і можливість повторного використання. Це дозволяє позиціонувати продукт у сегменті економічно та екологічно вигідних рішень для промисловості.

3. Ринкові бар'єри входу є помірними та подоланими. Технологія не потребує дорогого устаткування та складних умов упровадження, а основна сировина є доступною. Наявність конкурентів у галузі сучасних сорбентів не знижує перспектив, адже запропоноване рішення має вищу ефективність та кращий баланс «ціна/результат».

4. Обрана стратегія розвитку є доцільною. Стратегія диференціації та часткового наслідування лідерів ринку дозволяє підвищити впізнаваність продукту, забезпечити швидкий вихід на ринок та сформувати стійкі конкурентні переваги.

5. Маркетингова програма проєкту є збалансованою та системною. Сформовано:

- концепцію товару та ключові переваги;
- трирівневу структуру продукту;
- механізм ціноутворення;
- оптимальну систему збуту;
- концепцію комунікацій з цільовими споживачами.

Сукупність цих елементів забезпечує комплексний підхід до ринкового просування.

Отже, розроблений стартап-проект має реальні перспективи успішної ринкової реалізації, оскільки враховує екологічні тенденції, потреби промислових споживачів та забезпечує економічну ефективність для підприємств.

ВИСНОВОК

У магістерській дисертації виконано комплексне дослідження, спрямоване на розробку та оцінку ефективності модифікованих сорбентів на основі верхового торфу для вилучення іонів важких металів із водних розчинів на прикладі іонів міді (Cu^{2+}). Актуальність обраної теми зумовлена зростанням техногенного навантаження на водні ресурси та необхідністю впровадження екологічно безпечних і ресурсоефективних технологій очищення води.

У процесі виконання роботи проаналізовано сучасний стан проблеми забруднення водних об'єктів важкими металами та розглянуто основні методи їх видалення. Показано, що сорбційні методи є одними з найбільш перспективних завдяки високій ефективності, технологічній простоті та можливості використання природної сировини. Обґрунтовано доцільність застосування торфу як основи для створення поліфункціональних сорбентів з огляду на його доступність, екологічну безпечність і наявність активних функціональних груп.

Розроблено методику термохімічної модифікації верхового торфу з використанням різних хімічних активаторів та температурних режимів. Встановлено, що хімічна активація кислотними та лужними реагентами у поєднанні з термічною обробкою суттєво змінює структуру та поверхневі властивості торфу, сприяючи розвитку пористої структури та збільшенню кількості активних центрів сорбції.

Експериментальними дослідженнями підтверджено, що модифіковані торф'яні сорбенти демонструють значно вищу сорбційну здатність щодо іонів міді порівняно з немодифікованим торфом. Виявлено вплив типу активатора та температури карбонізації на ефективність вилучення Cu^{2+} , що дозволяє визначити оптимальні умови отримання сорбентів з покращеними характеристиками. Дослідження ізотерм та кінетики адсорбції показали інтенсивний перебіг процесу та досягнення рівноважного стану за відносно короткий час, що є важливим для практичного застосування.

Розглянуто екологічні аспекти використання та утилізації відпрацьованого сорбенту, що підтверджує доцільність застосування торф'яних матеріалів з

позицій сталого розвитку та мінімізації вторинного забруднення довкілля. Запропонований підхід поєднує ефективність очищення з низькою вартістю сировини та технологічною доступністю.

Таким чином, результати виконаної магістерської дисертації підтверджують перспективність використання модифікованих сорбентів на основі верхового торфу для очищення водних розчинів від іонів важких металів. Отримані наукові та практичні результати можуть бути використані при розробці технологій доочистки промислових і побутових стічних вод, а також слугувати основою для подальших досліджень і впровадження природоорієнтованих сорбційних матеріалів у сфері водоочищення.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Валієв, Н. Г. О., Лебзін, М. С., Усманов, А. І., & Зав'ялов, С. С. (2023). ВИКОРИСТАННЯ ТОРФУ В ЯКОСТІ СОРБЕНТУ Важких металів. Вісті Тульського державного університету. Науки про землю (3), 137-146.
2. Новосьолова, Л. Ю., & Сироткіна, Є. Є. (2008). Сорбенти на основі торфу для очищення забруднених середовищ (огляд). Хімія твердого палива (4), 64-77.
3. Житенев, Б. Н., Гуринович, О. Д., Сенчук, Д. Д. (2020). Дослідження сорбційних властивостей брикетованого торфу для очищення стічних вод від іонів кадмію, свинцю та міді. Вісник МДСУ, 15 (11), 1534-1545.
4. Хохотва О. П. Адсорбція важких металів сорбентом на основі соснової кори // Хімія та технологія води. - 2010, № 6, С. 604-612.
5. Andrews J.E., Brimblecombe P., Jickells T.D. An introduction to environmental chemistry. — 2nd ed. — Blackwell Publishing, 2004. — ISBN 0-632-05905-2.
6. Sarma G.K., Sen Gupta S., Bhattacharyya K.G. Nanomaterials as versatile adsorbents for heavy metal ions in water: a review // Environmental Science and Pollution Research. — 2019. — Vol. 26. — P. 6245–6278.
7. Ding Q. et al. Electrochemical detection of heavy metal ions in water // Chemical Communications. — 2021. — Vol. 57, No. 59. — P. 7215–7231.
8. Malik L.A. et al. Detection and removal of heavy metal ions: a review // Environmental Chemistry Letters. — 2019. — Vol. 17. — P. 1495–1521.
9. Wang Z. et al. Overview assessment of risk evaluation and treatment technologies for heavy metal pollution of water and soil // Journal of Cleaner Production. — 2022. — Vol. 379. — Article 134043.
10. Fu F., Wang Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review // Journal of Environmental Management. — 2011. — Vol. 92. — P. 407–418. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.

- 11.** Erniza M.J.J., Ahmad A.L., Low S.C. Separation efficiency of epoxified-polyethersulfone blend membrane for chromium removal // *Journal of Membrane Science Research*. — 2016. — Vol. 2. — P. 102–108.
- 12.** Tumolo M. et al. Chromium pollution in European water, sources, health risk, and remediation strategies: An overview // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. — 2020. — Vol. 17, No. 15. — Article 5438.
- 13.** Brandes R., Belosinschi D., Brouillette F., Chabot B. A new electrospun chitosan/phosphorylated nanocellulose biosorbent for the removal of cadmium ions from aqueous solutions // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. — 2019. — Vol. 7, No. 6. — Article 103477.
- 14.** Vilela P.B. et al. Polyacrylic acid-based and chitosan-based hydrogels for adsorption of cadmium: equilibrium isotherm, kinetic and thermodynamic studies // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. — 2019. — Vol. 7, No. 5. — Article 103327.
- 15.** Abukhadra M.R. et al. Promoting the decontamination of different types of water pollutants (Cd^{2+} , safranin dye, and phosphate) using a novel structure of exfoliated bentonite admixed with cellulose nanofiber // *Journal of Environmental Management*. — 2020. — Vol. 273. — Article 111130.
- 16.** Blanco A. et al. Lead uptake and translocation pathways in soybean seedlings: the role of ion competition and transpiration rates // *Environmental Science and Pollution Research*. — 2021. — Vol. 28. — P. 20624–20636.
- 17.** Wani A.L., Ara A., Usmani J.A. Lead toxicity: a review // *Interdisciplinary Toxicology*. — 2015. — Vol. 8, No. 2. — P. 55–64.
- 18.** Charkiewicz A.E., Backstrand J.R. Lead toxicity and pollution in Poland // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. — 2020. — Vol. 17, No. 12. — Article 4385.
- 19.** Dobre T. et al. Heavy Metal Pollution and Solutions for Its Control: General Aspects with a Focus on Cobalt Removal and Recovery from Aqueous Systems // *ChemEngineering*. — 2024. — Vol. 8, No. 6. — Article 118.

20. Liu Y. et al. Removal of copper ions from wastewater: a review // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2023. — Vol. 20, No. 5. — Article 3885.

21. Pensini E. et al. A ‘Three in One’ Complexing Agent Enables Copper Desorption from Polluted Soil, Its Removal from Groundwater and Its Detection // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. — 2021. — Vol. 624. — Article 126840.

22. Cardwell A.S. et al. Chronic toxicity of iron to aquatic organisms under variable pH, hardness, and dissolved organic carbon conditions // Environmental Toxicology and Chemistry. — 2023. — Vol. 42, No. 6. — P. 1371–1385.

23. Kumar P. et al. Environmental and human health implications of metal(loid)s: source identification, contamination, toxicity, and sustainable clean-up technologies // Frontiers in Environmental Science. — 2022. — Vol. 10. — Article 949581.

24. Awual M.E. et al. Ligand imprinted composite adsorbent for effective Ni (II) ion monitoring and removal from contaminated water // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. — 2024. — Vol. 131. — P. 585–592.

25. Li J.-J. et al. Detection of trace nickel ions with a colorimetric sensor based on indicator displacement mechanism // Sensors and Actuators B: Chemical. — 2017. — Vol. 241. — P. 1294–1302.

26. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Public Health Statement for Zinc [Электронный ресурс]. — 2005. — Режим доступа: <https://wwwn.cdc.gov/TSP/PHS/PHS.aspx?phsid=300&toxid=54>

27. Australian Government Department of Health. Draft Evaluation Statement – Zinc Stearate – 15 April 2024 [Электронный ресурс]. — 2024. — Режим доступа: <https://www.industrialchemicals.gov.au/sites/default/files/2024-04/EVA00143%20-%20Draft%20Evaluation%20Statement%20-%2015%20April%202024>

28. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Zinc. Chapter 6: Potential for Human Exposure [Электронный ресурс]. — 2005. — Режим доступа: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp60-c6.pdf>

29. Akash S. et al. Remediation techniques for uranium removal from polluted environment—Review on methods, mechanism and toxicology // Environmental Pollution. — 2022. — Vol. 302. — Article 119068.

30. Ince M., Ince O.K. Heavy metal removal techniques using response surface methodology: water/wastewater treatment // Biochemical Toxicology-Heavy Metals and Nanomaterials. — IntechOpen, 2019.

31. Susanto H., Ulbricht M. Characteristics, performance and stability of polyethersulfone ultrafiltration membranes prepared by phase separation method using different macromolecular additives // Journal of Membrane Science. — 2009. — Vol. 327. — P. 125–135.

32. Divrikli U. et al. Preconcentration of Pb(II), Cr(III), Cu(II), Ni(II) and Cd(II) ions in environmental samples by membrane filtration prior to their flame atomic absorption spectrometric determinations // Journal of Hazardous Materials. — 2007. — Vol. 145. — P. 459–464.

33. Pongstabodee S., Kunachitpimol N., Damronglerd S. Combination of three-stage sink–float method and selective flotation technique for separation of mixed post-consumer plastic waste // Waste Management. — 2008. — Vol. 28. — P. 475–483.

34. Gupta V.K. et al. Chemical treatment technologies for waste-water recycling—an overview // RSC Advances. — 2012. — Vol. 2. — P. 6380–6388.

35. Gutiérrez G, Lobo A, Benito J.M., Coca J., Pazos C. – Treatment of a waste oil-in-water emulsion from a copper-rolling process by ultrafiltration and vacuum evaporation // Journal of Hazardous Materials. – 2011. – Vol. 185. – P. 1569–1574.

36. Kumar V., Sahu S.K., Pandey B.D. – Prospects for solvent extraction processes in the Indian context for the recovery of base metals. A review // Hydrometallurgy. – 2010. – Vol. 103. – P. 45–53.
37. Esplugas S., Bila D.M., Krause L.G.T., Dezotti M. – Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water effluents // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 149. – P. 631–642.
38. Oller I., Malato S., Sánchez-Pérez J.A. – Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for wastewater decontamination – a review // Science of the Total Environment. – 2011. – Vol. 409. – P. 4141–4166.
39. Chakraborty R., Verma R., Asthana A., Sree Vidya S., Singh A.K. – Int. J. Environ. Anal. Chem. – 2019. – DOI: 10.1080/03067319.2019.1673743.
40. Bilal M., Shah J.A., Ashfaq T., Hussain Gardazi S.M., Tahir A.A., Pervez A., Haroon H., Mahmood Q. – J. Hazard. Mater. – 2013. – Vol. 263. – P. 322. – DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.07.071.
41. Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S., Ang H.M. – Adv. Colloid Interface Sci. – 2014. – Vol. 209. – P. 172. – DOI: 10.1016/j.cis.2014.04.002.
42. Гончарук В. В., Корнілович Б. Ю., Тарасевич Ю. І. Фізико-хімія очищення води : монографія. Київ : Наукова думка, 2012. 696 с.
43. Петров П. І., Микитенко В. О. Сучасні сорбційні матеріали: отримання та застосування. Львів : Магнолія, 2019. 290 с.
44. Ткаченко А. Н., Сухарев Ю. И. Синтетические сорбенты для очистки воды. Москва : Химия, 2005. 320 с.
45. Клименко М. О., Камінський В. В., Шмандій В. М. Очищення води від іонів важких металів. Рівне : НУВГП, 2020. 270 с.
46. Тарасевич Ю. И. Природные сорбенты в процессах водоочистки. Київ : Наукова думка, 2007. 180 с.

47. Li X., et al. Modification of biomass materials for heavy metal adsorption: a review. *Bioresource Technol* 2017; 244: 1077–1086
48. Marzeddu S. et al. Physical-Chemical Characterization of Different Carbon-Based Adsorbents. *Materials* [Электронный ресурс]. — 2022. — Vol. 15, no. 20. — P. 7162. — Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/20/7162>
49. Abegunde S. M., Idowu K. S., Adejuwon O. A., Ogunleye I. O. A review on the influence of chemical modification on the performance of adsorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [Электронный ресурс]. — 2020. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666916120300013>
50. Hubetska T. *Synthesis of activated carbon from peat and characterization* [Электронный ресурс] : Doctoral thesis. University of Oviedo, 2021. — 230 p. — Режим доступа: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/63267/TD>
51. Wiśniewska M. et al. Peat-based activated carbons as adsorbents for pollutants: preparation and properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [Электронный ресурс]. — 2020. — Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775719311720>
52. Activated Carbon: Fundamentals, Classification, and Properties. *ResearchGate* [Электронный ресурс]. — 2023. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/370672276_Activated_Carbon_Fundamentals_Classification_and_Properties
53. Мисников О. С. *Физико-химические основы торфяного производства* [Электронный ресурс] : учебное пособие. — Режим доступа: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-fiziko-himicheskie-osnovy-torfyanogo-proizvodstva.pdf>
54. Deliyanni E. A., Peleka E. N., Matis K. A. Iron-based nanoadsorbents for the removal of metal ions from water. In: *Combined and Hybrid Adsorbents*. Springer [Электронный ресурс]. — P. 120–150. — Режим доступа: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/1-4020-5172-7.pdf>

55. Andriambahiny R. N. A. et al. A review on the recent advancement of acid modified bio-adsorbents. *Environmental Chemistry Letters* [Електронний ресурс]. — 2025. — Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44371-025-00180-5>
56. Abegunde S. M., Idowu K. S., Adejuwon O. A. A review on the influence of chemical modification on the performance of adsorbents. *ResearchGate* [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/344460156>
57. Орлов Д. С. Гумусовые вещества и общая теория гумусового состояния почв. — Москва: МГУ, 2004. — 512 с.
58. Коноваленко Л. І., Левчук О. М. Торф: властивості, класифікація та напрями використання. — Київ: Наук. думка, 2016. — 284 с.
59. Ho Y.-S., McKay G. Sorption of copper(II) from aqueous solution by peat. *Water Research*. 2000. Vol. 34(3). P. 735–742.
60. Brown P. Adsorption characteristics of modified peat materials. *Water Research*. 2000. Vol. 34. P. 3907–3915.
61. Milojković J. Sorption of Cu(II) and Ni(II) ions on natural peat. *Chemical Engineering Journal*. 2013. Vol. 225. P. 394–403.
62. Чала Н. Г., Кузьмін О. В. Природні сорбенти у технологіях очищення стічних вод. — Харків: ХНУМГ, 2018. — 196 с.
63. Маркетинг стартап-проектів : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — 218 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>
64. Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

65. Semeniuk, S., Levytskyi, V., Fomina, O., Fedorchenko, K., Yudina, N., Ratynskiy, V., Shcherbatiuk, O., Bendiuh, V., & Zhurakivska, Y. (2024). Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(13 (129)), 57–69. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304997>
<https://journals.uran.ua/eejet/article/view/304997> .

66. Yudina N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // *Marketing and Management of innovations*. 3’2017, P. 245-256. DOI:10.21272/mmi.2017.3-23 <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.

67. Yudina, N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №23 (2022). PP. 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.23.2022.264637>.

68. Yudina, N. Algorythm Of Marketing Decision Making. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №22 (2022). PP. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.22.2022.260163>.

69. Yudina, N. Future Study Implementation Into Marketing Activity Of Companies. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №19 (2021). PP. 1-9 URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/240315>.

70. Yudina, N., Pidlisna, O. Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. *Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*. Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky

Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №18 (2021). PP. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.18.2021.238105>.

71. Yudina, N., Instrumenty Zarządzania Przyszłością. Marketing Instytucji Naukowych I Badawczych, Vol. 38, Issue 4,, 2020, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa. Poland, Warszawa, p. 1-19 ISSN 2353-8503 eISSN 2353-8414. http://minib.pl/wp-content/uploads/2020/12/4-Yudina_pl.pdf. DOI: 10.2478/minib-2020-0027.

72. Yudina, N. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". №17(2020). P. 372-383. URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/216380/>

73. Шифр «Перспектива» «ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ

74. СТИЧНИХ ВОД АПК ПРИ ВИКОРИСТАННІ ТОРФУ» [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/8_konferezii/perspektiva.pdf (С. 21)

75. Бондаренко О. М. Природоорієнтовані технології очищення води. Київ : Наук. думка, 2020. 296 с.

76. Бурлака О. М., Коваленко Н. В. Оцінка токсичності важких металів у водних екосистемах. Екологічні науки. 2021. № 2. С. 41–48.

77. Войтенко Л. В. Сорбційні методи в системах доочищення стічних вод. Харків : ХНУМГ, 2019. 214 с.

78. Галайда М. П. Хімічна модифікація природних сорбентів. Львів : Вид-во ЛНУ, 2018. 232 с.

79. Горбач О. І., Шевченко Т. М. Адсорбційні процеси у водному середовищі. Київ : Основа, 2020. 288 с.

80. Долін В. В. Геохімія техногенного забруднення вод. Київ : Наук. думка, 2017. 348 с.

81. Журавель М. І. Екологічна безпека водних ресурсів України. Київ : Академперіодика, 2019. 304 с.

82. Загорулько А. М. Торф як сировина для екотехнологій. Суми : СумДУ, 2018. 198 с.
83. Іванченко О. В. Методи вилучення іонів важких металів зі стічних вод. Хімія і технологія води. 2020. № 4. С. 22–29.
84. Калініченко О. А. Модифіковані біосорбенти в екологічній інженерії. Полтава : ПНПУ, 2021. 240 с.
85. Козловська Н. М. Гумінові речовини та їх роль у сорбційних процесах. Львів : Сполом, 2016. 212 с.
86. Кравчук Л. С. Технології очищення промислових стічних вод. Київ : Кондор, 2019. 320 с.
87. Левченко Г. В., Романюк О. М. Природні адсорбенти для водоочищення. Вісник НУВГП. 2021. № 1. С. 55–62.
88. Лисенко В. О. Фізико-хімічні основи сорбції. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 186 с.
89. Мартинюк В. О. Екологічна токсикологія важких металів. Рівне : НУВГП, 2017. 268 с.
90. Мельничук П. С. Сорбційні матеріали на основі біомаси. Житомир : ЖДТУ, 2020. 224 с.
91. Міщенко О. В. Екологічні аспекти очищення води. Київ : Центр учбової літератури, 2019. 312 с.
92. Нестеренко В. Г. Адсорбційні процеси в природних системах. Харків : НТУ «ХП», 2016. 205 с.
93. Олійник О. Я. Сорбенти природного походження. Луцьк : Вежа-Друк, 2021. 190 с.
94. Павленко М. С. Іонообмінні процеси у водоочищенні. Київ : Либідь, 2018. 264 с.
95. Петренко І. В. Очищення води від іонів міді та нікелю. Екологія довкілля. 2020. № 3. С. 37–44.
96. Романенко В. Д. Гідрохімія природних вод. Київ : Наук. думка, 2016. 360 с.

97. Савчук Л. М. Технології сорбційного вилучення металів. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 210 с.
98. Сидоренко Ю. В. Екологічна оцінка стічних вод. Дніпро : ДНУ, 2018. 256 с.
99. Ткаченко Н. П. Природні ресурси та екологічна безпека. Київ : Академія, 2020. 304 с.
100. Федоренко В. О. Хімія поверхневих явищ. Харків : Фоліо, 2017. 288 с.
101. Хомутецька Н. М. Біосорбція важких металів. Чернівці : ЧНУ, 2021. 198 с.
102. Чабан О. І. Екологічні технології очищення стічних вод. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2020. 312 с.
103. Шевчук В. Я. Сталий розвиток та водні ресурси. Київ : Геопринт, 2019. 280 с.
104. Яремчук О. С. Адсорбція іонів металів природними матеріалами. Хімічна промисловість України. 2021. № 1. С. 19–26

ДОДАТОК А
ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ПІДСУМКАМИ
МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

CERTIFICATE

is awarded to

Taradai Maiia

for being an active participant in

XIII International Scientific and Practical Conference

“SCIENTIFIC RESEARCH: MODERN CHALLENGES AND FUTURE PROSPECTS”



24 Hours of Participation
(0,8 ECTS credits)

MUNICH

4-6 August 2025

sci-conf.com.ua



CERTIFICATE

is awarded to

Taradai Maiia

for being an active participant in

II International Scientific and Practical Conference

“INTERNATIONAL EXPERIENCE IN SCIENTIFIC RESEARCH”



24 Hours of Participation
(0,8 ECTS credits)

CHICAGO

25-27 September 2025

sci-conf.com.ua

