

**Міністерство освіти та науки України
Вінницький державний педагогічний університет
імені Михайла Коцюбинського
Природничо-географічний факультет
Кафедра хімії та методики навчання хімії**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«ОДЕРЖАННЯ СОРБЕНТІВ ІЗ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВ ТА
ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ В ШКІЛЬНОМУ
КУРСІ ХІМІЇ»**

Виконала:

Здобувачки 2 курсу

СВО магістра групи 2МХБ

Освітня програма Середня освіта. Хімія,
біологія та здоров'я людини

Спеціальність 014 Середня освіта

Предметна спеціальність 014.06 Середня
освіта (Хімія)

Галузь знань 01 Освіта/Педагогіка

Немировська Альона Юріївна

Науковий керівник: кандидат технічних наук,
доцент кафедри хімії та методики навчання
хімії

Худоярова Ольга Степанівна

Розширена шкала _____

Кількість балів: _____ Оцінка:ECTS _____

Голова Екзаменаційної комісії _____ (_____)

Члени комісії: _____ (_____)

_____ (_____)

_____ (_____)

м. Вінниця – 2025 р.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена вирішенню питання одержання ефективних сорбентів із відходів виробництв, визначенню можливості їх використання як вторинної сировини та застосуванню в технологіях очищення стічних вод, а також використанню результатів досліджень в шкільному курсі хімії. Проведено дослідження, що пов'язані з регенерацією і модифікацією відходів сорбентів харчової промисловості з метою підвищення сорбційної ємності щодо іонів купруму(II), а також одержанням сорбентів із відходів рослинної сировини. Встановлена можливість використання відпрацьованих сорбентів виробництва газованих напоїв та сорбентів на основі відходів рослинної сировини для очистки промислових стічних вод від важких металів, запропоновано вивчення одержання сорбентів із відходів виробництв та їх практичне значення в шкільному курсі хімії.

Ключові слова: відходи виробництв, відпрацьовані сорбенти, очищення стічних вод, сталий розвиток, шкільний курс хімії, екологічне мислення

ABSTRACT

The qualification work is devoted to solving the issue of obtaining effective sorbents from industrial waste, determining the possibility of their use as secondary raw materials and application in wastewater treatment technologies, as well as using the results of research in the school chemistry course. Research has been conducted related to the regeneration and modification of waste sorbents of the food industry in order to increase the sorption capacity for copper(II) ions, as well as obtaining sorbents from plant waste. The possibility of using spent sorbents from the production of carbonated drinks and sorbents based on plant waste for the purification of industrial wastewater from heavy metals has been established, and a study of the production of sorbents from industrial waste and their practical significance in the school chemistry course has been proposed.

Keywords: industrial waste, spent sorbents, wastewater treatment, sustainable development, school chemistry course, ecological thinking

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУЧАСНИХ СОРБЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	9
1.1. Аналіз сорбційних матеріалів та відходів виробництв, що використовуються для очищення стічних вод.....	9
1.2. Загальна характеристика сорбентів, які використовують в харчовій промисловості.....	16
1.3. Характеристика відпрацьованих сорбційних матеріалів харчової промисловості, що використовуються для очищення стічних вод.....	19
1.4. Характеристика адсорбційних властивостей сорбентів та методики їх визначення.....	22
РОЗДІЛ 2. ОДЕРЖАННЯ ЕФЕКТИВНИХ СОРБЕНТІВ ІЗ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВ.....	27
2.1. Об'єкти дослідження.....	27
2.2. Методика регенерації відпрацьованого сорбенту (AB+K).....	30
2.3. Методика отримання карбонового сорбенту з кавової гущі.....	32
2.4. Методика адсорбційного очищення промислових стічних вод.....	33
РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ХІМІЇ.....	38
3.1. Методичні аспекти інтеграції результатів досліджень сорбентів, отриманих з відходів, у шкільний курс хімії.....	37
3.2. Проект «Рециклінг твердих відходів промисловості»	41
3.3. Лабораторна робота «Регенерація відпрацьованого сорбенту виробництва газованих напоїв та визначення сорбційної ємності за йодом».....	44
ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	48

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АВ – активоване вугілля;

К – кізельгур;

АБС – пластик – кополімер акрило-нітрил-бутадієнстиролу

БВ – базальтове волокно

ГДК – гранично допустима концентрація;

РФА – рентгенофазовий аналіз;

ІЧ - спектроскопія – інфрачервона спектроскопія;

МБ – метиленовий блакитний, $C_{16}H_{18}N_3SCl$;

СОЄ – статична обмінна ємність;

ЕДТА – етилендіамінтетраацетат.

МП – модифікована поверхня

РС – регенерований сорбент

МС – модифікований сорбент

ВСТУП

Актуальність теми. Важливими показниками розвитку суспільства є ріст промислового виробництва, що спонукає до впровадження великої кількості нових технологій і відповідно до створення нових речовин та матеріалів. Задовольняти потреби сучасного суспільства, не ставлячи під загрозу життя й діяльність майбутніх поколінь є метою сталого розвитку. Сталий розвиток людства полягає у встановленні балансу між задоволенням його сучасних потреб у безпечному й здоровому довкіллі та захистом від негативного впливу «благ цивілізації» майбутніх поколінь людей. Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів є однією з ключових глобальних проблем сучасності. Критичною для багатьох країн, незалежно від рівня їх економічного розвитку, є проблема утилізації відходів. Тому скорочення обсягів утворення відходів та їх переробка, зокрема, для отримання корисних нетоксичних продуктів, є важливим завданням сучасного суспільства. Сучасне суспільство має на меті мінімізувати утворення відходів і забезпечити ефективну утилізацію вже накопичених запасів, перетворюючи їх на корисні, екологічно безпечні продукти. Для вирішення питання утилізації відходів в Україні в 2017 р. розроблена Національна стратегія з управління відходами, що передбачає план до 2030 р. Утилізація відходів буде успішно вирішена шляхом приведення політики поводження з ними у відповідність до європейських вимог [1].

Раціональне природокористування є одним із пріоритетних напрямів наукових досліджень і розробок в Україні. Цей напрям охоплює створення інноваційних технологій для збереження та збалансованого використання всіх природних ресурсів (мінеральних, земельних, водних, біотичних). Особливо актуальним є питання збереження водних ресурсів та забезпечення населення питною водою, що включає інтегроване управління, технології водоочищення та боротьбу із забрудненням стічними водами. Забруднюючі речовини роблять воду непридатною в господарстві і навіть небезпечною. Таким чином

[2], існує небезпека для здоров'я населення завдяки потраплянню у природні води забруднюючих речовин. Очищення великих обсягів промислових стічних вод, що утворюються на підприємствах хімічної та нафтохімічної промисловості, є критично важливим. Ці стоки перенасичені забруднюючими речовинами, зокрема іонами важких металів, таких як $\text{Cu}(2+)$, що значно перевищують ГДК. Серед існуючих фізико-хімічних технологій водоочищення лідером є метод адсорбції. Він передбачає використання широкого спектра сорбентів – як природного, так і синтетичного походження [3-5]. Проте очистка стічних вод не гарантує екологічної безпеки. Саме у результаті очистки утворюються тверді відходи, які найчастіше складаються. Екологічна стратегія має передбачати не лише очищення та повторне використання води у замкнених циклах, але й уникнення утворення нових твердих відходів, зокрема у вигляді відпрацьованих сорбентів. Ключовим завданням є не лише водоочищення та її рециркуляція у виробництві, але й запобігання генерації додаткових твердих відходів у формі відпрацьованих сорбуючих матеріалів. Зокрема, у харчовій промисловості велика кількість активованого вугілля та кізельгуру, що слугували для очищення цукрового сиропу, викидається, а не регенерується для повторного використання. На сьогодні відсутність повторного використання значних обсягів активованого вугілля та кізельгуру, зокрема у сфері очищення цукрового сиропу, залишається значною проблемою. Для вирішення цієї проблеми [6] виникає необхідність вивчення умов регенерації, модифікації відпрацьованого сорбенту з метою повторного його використання для очищення промислових стічних вод різних виробництв. Одержані результати досліджень можуть бути запропоновані для вивчення одержання сорбентів із відходів виробництв та відходів рослинної сировини в шкільному курсі хімії та сприяти формуванню екологічного мислення, підприємливості, інноваційності та відповідального ставлення до довкілля у здобувачів освіти.

Мета дослідження. Одержати сорбенти на основі відходів виробництва, дослідити адсорбційну здатність регенованого сорбенту на основі

активованого вугілля та кізельгуру щодо іонів важких металів, зокрема купрум(II)-іонів. Розробити методичні рекомендації щодо інтеграції результатів досліджень сорбентів, отриманих з відходів, у шкільний курс хімії.

Завдання:

- провести літературний та патентний огляд карбонових сорбентів, одержаних із відходів рослинної сировини та сорбційних матеріалів на основі відпрацьованих активованого вугілля та кізельгуру, які використовують в сучасних технологіях очищення стічних вод;
- провести аналіз адсорбційних властивостей відпрацьованих сорбентів харчової промисловості та сорбентів на основі сільськогосподарських відходів;
- встановити можливість використання відпрацьованих сорбентів та сорбентів на основі відходів рослинної сировини для очистки промислових стічних вод;
- описати вивчення одержання сорбентів із відходів виробництв та їх практичне значення в шкільному курсі хімії;

Методи дослідження. Теоретичні та емпіричні методи. Аналітична частина роботи включає методи: моделювання, експеримент, вимірювання, розрахунок, аналіз, опис.

Об'єкт дослідження. Відходи виробництв та процес одержання сорбентів з різноманітних відходів виробництв. Методи та прийоми включення результатів наукових досліджень у зміст шкільного курсу.

Предмет дослідження. Сорбційні властивості отриманих сорбентів та їх ефективність для очищення стічних вод від купрум(II)-іонів. Методичні аспекти інтеграції результатів досліджень отримання ефективних сорбентів із відходів виробництв у зміст шкільних уроків хімії.

Наукова новизна роботи полягає в комбінації детального аналізу відпрацьованих сорбентів харчової промисловості та сорбентів на основі відходів рослинної сировини з пошуком інноваційних рішень для повторного їх використання в технологіях водоочищення та зменшення навантаження на

екологію, а також у формуванні екологічної компетентності учнів закладів загальної середньої освіти на принципах «зеленої хімії».

Практична цінність роботи полягає у створенні доступного, дешевого та екологічно чистого сорбенту, а також у впровадженні дослідницьких результатів у навчальний процес як наочного та проблемно-орієнтованого матеріалу.

Структура і обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаної літератури (46 найменувань). Загальний обсяг роботи становить 53 сторінки. Робота містить 6 рисунків і 8 таблиць.

Результати роботи викладено в наукових статтях:

1. Худоярова О.С., Немировська А.Ю., Манченко І.В. Одержання ефективних сорбентів із відходів виробництв. Інноваційні матеріали та технології: біотехнологія, прикладна хімія, екологія: збірник тез II Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 95-річчю Київського національного університету технологій та дизайну 30-31 жовтня 2025 р. Київ: КНУТД, 2025. С. 120.

2. Худоярова О., Мельник С., Немировська А. Комплексне водоочищення стічних вод окремих промислових виробництв. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку природничо-математичних наук та методик їх викладання: збірник тез II Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка 30-31 жовтня 2025 р. Глухів, 2025. С. 270-273.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУЧАСНИХ СОРБЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Аналіз сорбційних матеріалів та відходів виробництв, що використовуються для очищення стічних вод

При використанні сорбентів (речовин, що поглинають інші речовини – сорбати) важливе значення має низка факторів, які можна розділити на три основні групи: властивості сорбенту, властивості сорбату та умови процесу сорбції.

Для очищення стічних вод в якості адсорбентів застосовують природні і штучні пористі матеріали такі, як: зола, коксова дрібниця, торф, силікогелі, алюмогелі, активні глини та інші. Адсорбційні властивості того чи іншого сорбенту залежать в основному від структури пор, їх величини і розподілу за розмірами. Залежно від переважаючого розміру пор сорбенти підрозділяють на мікропористі, макропористі та змішаного типу. Ефективність адсорбційного очищення досягає 80 – 95 % і залежить від хімічної природи адсорбенту, величини адсорбційної поверхні і її доступності, від хімічної будови речовини і її стану у водному розчині.

Адсорбція активованим вугіллям (АВ) є одним з основних методів очищення промислових вод і дозволяє добитися глибокої очистки води до норм ГДК шкідливих забруднювачів у воді промислового, оборотного використання з одночасною утилізацією або деструктивним руйнуванням витягнутих речовин. Переваги даного методу – можливість проводити адсорбцію речовин з багатокомпонентних домішок, а також висока ефективність, особливо при очищенні стічних вод з низькою концентрацією забруднювача. Відомо [7], що до активованого вугілля, що використовується для очищення промислових стічних вод, висувають такі вимоги: легке змочування водою; відносно крупна пористість; невелика утримуюча

здатність при регенерації; мінімальна каталітична активність щодо реакцій окиснення, конденсації тощо. Адсорбційна здатність активного вугілля є наслідком сильно розвиненою поверхні і пористості. Питома поверхня активного вугілля становить 400–900 м²/г [7]. Адсорбційні властивості в значній мірі залежить від структури, величини пор. Початковою сировиною для отримання активного вугілля служать практично будь-які матеріали, що містять вуглець: вугілля, торф, деревина та ін. На цей час випускаються такі основні марки активованого вугілля для адсорбції з рідкої фази: СКТ-0, АГ-3-0, АГ-3А, АГ-3В, АГ-3І, БАУ, ОУ-А, ОУ-В, а також особливо міцні – ФАС-3, АГ-90, АГ-95. Фактично активне вугілля можна отримати піролізом будь-якої мінеральної та органічної карбонвмісної сировини. Активування вугілля – складний гетерогенний високотемпературний процес (800–1000 °С), у ході якого під дією рідких або газових активаторів відбувається формування розвиненої поруватої структури, додаткове окиснення та вигорання частини неорганізованого вуглецю, структурування елементарних кристалітів.

Процес виготовлення високоякісного активного вугілля складний і тривалий, тому вартість його достатньо висока. Це призводить до необхідності багаторазового використання активного вугілля або його використання як вторинної сировини, наприклад, як добавку до шихти для коксування. Тому широке застосування активного вугілля при очищенні стічних вод стримується економічними рамками.

Активоване вугілля і його модифікації досить універсальні по відношенню до різних класів хімічних речовин (неорганічних і органічних), що дозволяє очищати воду від поллютантів різної хімічної природи. Активоване вугілля (АВ), а особливо його синтетичні модифікації, як відомо, характеризується більш вираженими сорбційними, іонообмінними та відновними властивостями порівняно з технічними вуглецями, а також підвищеною міцністю. Це дає можливість забезпечити його стабільну роботу та тривале використання.

Адсорбенти з високою сорбційною ємністю надто дорогі і є дефіцитними. Використовувати такі сорбенти економічно доцільно лише за умови їх багаторазового використання. Тому необхідним елементом будь-якої технологічної схеми адсорбційного очищення є регенерація адсорбенту після поглинання ним забруднюючих речовин, витягнутими зі стічних вод.

Для синтезу неорганічних сорбентів потрібно дороге устаткування та хімічні реагенти. Також це пов'язано зі складними та ресурсозатратними операціями, що істотно впливає на вартість сорбентів та несе екологічні ризики. Це робить їх застосування неможливим для вирішення проблем, пов'язаних із переробкою великих об'ємів виробничих стічних вод.

На властивості вуглецевих сорбентів має суттєвий вплив хімія поверхні. Наявність певних поверхневих функціональних груп (гідроксильних, карбоксильних, сульфідних та ін.) визначає поведінку сорбентів у різноманітних фізико-хімічних процесах, у тому числі, технологічних [8]. Присутність навіть незначної кількості певних поверхневих груп або атомів може суттєво впливати на характеристики сорбенту та суттєво змінювати параметри процесів за його участю. Так, наприклад, при введенні до складу вугілля 2–3 % кисню або азоту, підвищується у декілька разів аніонообмінна здатність, каталітична активність і адсорбційна ємність вугілля.

Також відомо про використання відходів виробництв в якості сорбентів. Так, наприклад, відходи виробництва азбестових паперів та картону - азбестовмісні матеріали, пористий полімерний сорбент - кополімер стирену та дивініл бензолу, пінополіуретан, сорбент на основі базальтового волокна, дерев'яні стружки, тирсу, волокна, поміщені в пористі тканини оболонки, різні модифікації активного вугілля і інші адсорбенти.

При пошуку ефективних сорбентів для очищення стічних вод в першу чергу дослідження йдуть в напрямку ефективних і недорогих сорбентів. Для водоочищення промислових стоків необхідні найрізноманітніші сорбенти: високочисті і з високою ємністю, сорбенти середньої ємності і вибіркості, а також сорбенти, де менша сорбційна ємність і селективність може

компенсуватися невисокою вартістю. Надається перевага активованим вуглецевим матеріалам, але також використовується дешеве низькосортне вугілля і відходи виробництва без додаткової переробки.

Вуглецеві волокнисті матеріали є перспективними сорбентами за рахунок поєднання в одному сорбенті фільтруючих і сорбційних властивостей, високої питомої поверхні і розвиненої пористості. Одним з таких сорбентів є базальтоне волокно (БВ). БВ отримують шляхом розплаву магматичних порід і базальту. Базальтоне волокно є хаотично розташованими штапельними волокнами товщиною до 3 мкм. Хімічний склад волокна представлений такими оксидами (%): 47,8-SiO₂; 15,9-Al₂O₃; 8,9-CaO; 6,3-FeO; 5,8-MgO; 15,4 – решта. Цей сорбційний матеріал екологічно чистий, не горить.

Для очищення стічних вод використовують сорбент [9] на основі твердого залишку від згоряння вугільних териконів. Це кремнезем з домішкою оксидів алюмінію і феруму. Описаний сорбент має невисоку собівартість за рахунок зосередження величезних запасів в місцях переробки. Відомо також про сорбційний матеріал (КЗ-С) є відходом виробництва солей алюмінію і призначений для очищення води від іонів важких металів.

В роботі [10] автори пропонують використовувати як сорбент металургійний шлак. Пропонується модифікувати шлак хлоридною кислотою, внаслідок чого відбувається збільшення реакційної здатності. У процесі модифікації шлак перетворюється в полікремнієві кислоти. Ефективність очищення збільшується за рахунок адсорбції фосфат-іонів на пористій структурі шлаку. Отримані сорбенти мають високу сорбційну активність по відношенню до іонів нікелю та купруму, ефективність вилучення яких складає 90-98%.

Відходи гідроалюмінатного бетону у вигляді подрібненого матеріалу також використовуються як сорбційний матеріал [9]. Його застосовують для очистки стоків, а саме здійснюють фільтрацію через сорбент товщиною шару 0,05-0,06 м масою 15-20 г. Використання подрібненого гідроалюмінатного бетону забезпечує підвищення сорбційної ємності щодо купрум(II)-іонів за

рахунок зменшення висоти шару сорбенту при очищенні. Це призводить до економії сорбенту, збільшення швидкості фільтрування та скорочення часу очищення.

В якості сорбенту також використовують відходи виробництва електролізного алюмінію. Запропонований як сорбент матеріал [9] має високі адсорбційні характеристики по відношенню до купрум(II)- та плюмбум-іонів. Екологічний та економічний ефект запропонованого методу зумовлений утилізацією відходів виробництва електролізного алюмінію.

Відомо [9] про отримання сорбційного матеріалу для очищення води від радіонуклідів та іонів важких металів на основі твердих відходів гальванічних виробництв. Як полімерну основу, на яку наносили відходити гальваніки, використовували полівінілхлорид, ацетат целюлози, а також АБС – пластик (акрилонітрилбутадієнстирен), що містить 5,25% бутадієнстиренового каучуку, 15-30% акрилонітрилу, решта - стирен.

Сорбційні матеріали можуть бути одержані як на основі переробки відходів різних виробництв, так і на основі відходів рослинництва. Також потрібно сказати про використання природних сорбентів, запаси яких в Україні достатні. Закон України «Про затвердження загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року» підтверджує, що мінерально-сировинна база України є достатньо вагомою порівняно із світовими запасами. Згідно з техніко-економічними розрахунками, наведеними в програмі, потреба в мінерально-сировинних ресурсах базується на освоєнні новітніх технологій [11]. Природні сорбенти також відносяться до такої мінеральної сировини. У працях науковців ВДПУ ім. М. Коцюбинського доведено доцільність та перспективність використання природних сорбентів, зокрема для очищення стічних вод від купрум- та хром-іонів. Відомо [12-14], що завдяки пористій структурі та високорозвиненій поверхні такі мінеральні сорбенти, як бентоніт, палигорськіт, глауконіт проявляють високі адсорбційні, каталітичні та іонообмінні властивості і здатні вибірково вилучати з водних розчинів різні класи забруднюючих речовин.

Одним із важливих аспектів використання природних мінералів для потреб різних галузей промисловості є їхня не токсичність. Економічна доцільність використання цих реагентів у різних технологічних процесах зумовлена можливістю регулювання їхньої геометричної структури та хімічної природи поверхні. Важливим аспектом є також наявність в Україні достатніх запасів, зосереджених у промислових родовищах, і невисокою вартістю мінералів.

Перспективним напрямком досліджень є використання карбонових сорбентів, одержаних з рослинної сировини. Європейська практика передбачає повторне використання таких відходів, зокрема, для виробництва кормів, добрив, паливних палет, продуктів екологічного, медичного або харчового призначення [15]. Карбонізація сільськогосподарських відходів має ту перевагу, що дозволяє отримувати більший вихід вугілля в порівнянні з карбонізацією деревини. Крім того, активоване вугілля з шкаралупи мигдалю, горіхів, кісточок абрикоса і вишні має низький вміст золи в порівнянні з вугіллям, отриманими з виноградних кісточок. Всі види вугілля з лігноцелюлозних відходів мають низький вміст Сульфору.

Карбонові сорбенти, одержані з рослинної сировини, застосовуються для різних галузей виробництва, зокрема для вилучення забруднюючих речовин з рідин, зокрема, барвників, іонів важких металів, пестицидів [16]. Це сорбенти з специфічним комплексом властивостей: певною пористою структурою, складом поверхневих функціональних груп, необхідної форми, міцності, ступенем чистоти та ін. Так, для адсорбційної очищення рідин і вилучення цінних металів з розчинів важливе значення має гідрофільність поверхні карбонового сорбенту. Для сорбентів, що використовуються в хроматографічних методах, важливий склад поверхневих функціональних груп. Має значення ціна сорбентів. Для очищення газових викидів і рідких стоків намагаються застосовувати відносно дешеві порошкові сорбенти, отримані з доступної і недорогої сировини (копалин твердих палив, деревних та сільськогосподарських відходів) з використанням інтенсивних технологій суміщеного процесу карбонізації та активації.

У таблиці 1.1 представлені характеристики пористої структури і виходу активованого вугілля, отриманого на основі різних відходів переробки сільськогосподарської сировини.

Таблиця 1.1

Основні характеристики активованого вугілля, отриманого з відходів переробки сільськогосподарської сировини [17, 19, 20]

Найменування відходу	Питома поверхня, $\text{м}^2/\text{г}$	Сумарний об'єм пор, V_s	Вихід, $W, \%$
Абрикосова кісточка	1190	0,50	18,2
Вишнева кісточка	875	0,28	11,2
Кісточки винограду	497	0,12	26,2
Горіхова шкаралупа	743	0,21	17,9
Шкаралупа фісташка	778	0,47	-
Макадамія (горіх Австрійський)	1718	0,72	-
Шкаралупа земляного горіха	253	0,17	29,0
Шкаралупа мигдального горіха	998	0,40	17,8
Вівсяні висівки	522	86,8	-
Кукурудзяні стрижні	960	0,50	28,8
Стрижні бавовнику	37	-	30,0
Ячмінна солома	642	0,27	-
Кукурудзяні стебла	1010	0,43	-

Актуальним на сьогоднішній день є питання отримання і використання карбонових сорбентів шляхом застосування нанотехнологій [17]. Наносорбенти мають ряд переваг: наявність унікальних механічних, хімічних і електричних властивостей, значна питома поверхня, достатня міцність,

однорідна структура. Тому вони знайшли широке застосування у виробництві сучасних фільтрів, в фармації, металургії і електроніці [18].

1.2. Загальна характеристика сорбентів, які використовують в харчовій промисловості

Сорбенти, які використовуються в харчовій промисловості – це тверді або рідкі речовини, що використовуються для видалення небажаних компонентів (домішок, токсинів, барвників, продуктів окиснення) з харчової сировини або кінцевих продуктів шляхом сорбції. Адсорбенти, які безпосередньо контактують з продуктами, повинні бути біологічно нешкідливими, тобто нетоксичними, інертними по відношенню до основних цінних складових продукту, міцними, не засмічувати продукт. Сорбенти виконують критичні функції для підвищення якості, стабільності та безпеки харчових продуктів: освітлення та знебарвлення; очищення та детоксикація; дезодорація; стабілізація; осушення. Ефективність сорбенту залежить від його фізико-хімічних характеристик: сорбційної ємності (питома поверхня, пористість і розподіл пор за розміром); хімічної природи поверхні (функціональні групи, вибірковість); фізичної міцності і стабільності.

В харчовій промисловості широко використовуються наступні адсорбенти: активоване вугілля, силікагелі, цеоліти, іоніти, бентоніт, діатоміт, каолін, риб'ячий клей – желатин.

Активоване вугілля – найпоширеніший адсорбент. Цей сорбент дозволяє не тільки поліпшити органолептичні властивості продуктів харчування, але й видаляти з їхнього складу шкідливі домішки. В останні роки воно використовувалося як ефективний адсорбуючий матеріал у процесі знебарвлення цукрового сиропу з огляду на його велику площу внутрішньої поверхні та поверхнево-функціональні групи. Активоване вугілля застосовується також при очищенні гліцерину, рослинних олій, фруктових соків, алкогольних і безалкогольних напоїв, патоки, харчових кислот тощо.

Основна сировина для виробництва активованого вугілля –

кам'яновугільний напівкокс; рослинні матеріали, що містять вуглець, наприклад, деревинне вугілля, торф, тирса, шкаралупа горіхів, кісточки плодів фруктових дерев. Продукти карбонізації цієї сировини піддають активації при 850–950 °С. Також активоване вугілля одержують термічним розкладанням синтетичних полімерів [21]. При цьому в одному грамі активованого вугілля досягають величезної сумарної поверхні пор – від 600 до 1750 м² /г. Розміри частинок активованого вугілля лежать в межах від 1 до 5 мм. Насипна густина 250...450 кг/м³. Вони відрізняються низьким змістом золи (менше 8 %). Недолік – мала механічна міцність і горючість.

АВ є гідрофобним неполярним адсорбентом і найкраще поглинає речовини з полярних розчинів, особливо з води. Здатність до адсорбції зростає зі збільшенням числа подвійних, потрійних та спряжених зв'язків у молекулі [22]. АВ належить до тонкопористих адсорбентів, розмір яких коливається в основному в інтервалі 15-50 Å. В активному вугіллі розрізняють мікропори з отворами діаметром 10-20 Å (поверхня до 1000 м²/г), пори перехідних розмірів –50-500 Å (поверхня до 100 м²/г), макропори –понад 1000 Å (поверхня до 1 м²/г). Інтенсивна адсорбція відбувається в мікропорах. В основі отримання АВ є розвиток існуючої пористості вихідної речовини. Ця пористість може бути розвинена термічною обробкою при дуже високих температурах (фізична активація) або хімічним окисленням з використанням мінеральної кислоти чи хлориду цинку при температурі близько 550 °С (хімічна активація) [22]. Адсорбційні сили при фізичній адсорбції мають характер міжмолекулярних сил взаємодії в рідинах та твердих тілах.

Харчова промисловість є одним з найбільших споживачів активованого вугілля, а також низки інших сорбентів (діатоміт, перліт, кізельгур) при освітленні пива в пивоварному виробництві, фруктових соків - у консервному, вина - у виноробстві [23, 24]. Їх використовують при безпосередньому введенні в суспензію або попередньо наминають шар на робочу поверхню фільтра а також ці матеріали мають адсорбційні властивості [23].

Кисень часто використовують як домішку до активованого вугілля (АВ). Вміст кисню коливається від 2 до 25 % в окисненому активованому вугіллі. Від 25 % усього Оксигену, що міститься в активованому окисненому вугіллі, входить до складу поверхневих оксидів, які мають властивості об'ємних сполук з відповідними функціональними групами. Специфічна взаємодія поверхні вугілля з органічними речовинами спостерігалась лише при наявності карбонільних груп на поверхні вугілля та виникненні донорно-акцепторних комплексів [21]. На аморфній частині поверхні активованого вугілля в процесі хімічної активації утворюються деякі кисневмісні функціональні групи, такі як карбоксильна група (-COOH), гідроксильна група (-OH) і карбонільна група. Завдяки цим функціональним групам активоване вугілля володіє властивостями хімічної адсорбції, каталітичного окислення та відновлення і може ефективно видаляти деякі іони металів зі стічних вод.

Діатоміт (кізельгур, діатомова земля) – фільтруючий матеріал, який також широко використовується в харчовій промисловості. Діатоміт є мікроскопічними фрагментами скелетів діатомітів, водних водоростей, багатих кремнеземом. Ці скелети мають високу поверхневу активність і численні мікропори, що дозволяє їм ефективно фільтрувати і вловлювати дрібні частинки і органічні речовини у воді. Завдяки такому складу, діатоміт має високу здатність фільтрувати та утримувати зважені частинки, включаючи бруд, пісок, іржу та інші механічні забруднювачі у воді. А також адсорбувати органічні речовини, хлор, хімічні домішки та токсичні сполуки плюмбуму, купруму(II) та меркурію.

Як наслідок, завдяки своїм властивостям поглинання, кізельгур здатний усувати неприємні запахи та смак у воді, пов'язані з органічними речовинами та хлором. А ще він є натуральним продуктом і не містить хімічних добавок чи шкідливих речовин. Його застосування абсолютно не токсичне і не впливає на навколишнє середовище, що робить продукт безпечним для використання в будь-яких системах очищення води (для питних потреб, акваріумів, басейнів, промислових установок та стічних вод).

Кізельгурові частинки мають розмір від 0,001 до 0,01 мм. Частини кізельгуру мають багаточисельні порожнини і пори розмірами тільки однієї десятої долі мікрометра. Саме тому приблизно 80 % всього добутого в світі кізельгуру використовуються для фільтрації. У якості фільтруючого матеріалу більшу частину кізельгуру використовує пивоварна промисловість. Фільтрація - це, головним чином, механічне видалення всіх живих дріжджів із напою. Кізельгур як фільтруючий агент дозволяє видаляти колоїдні речовини, які складаються з білкових сполук фенольних речовин, гумі-речовин і хмельових смол. Зниження частки колоїдів покращує фізико-хімічні властивості пива, його стійкість, але знижує піностійкість і повноту смаку пива [25]. Кізельгур практично не має адсорбційну здатність, але її можна підвищити завдяки додаванню целюлози, активованого вугілля або стабілізаторів. Пропускна здатність фільтру з кізельгуру залежить від вибору ступеня дисперсності кізельгуру або перліту. Фільтруюча здатність фільтру з кізельгуру може відносно постійно підтримуватися завдяки поточному дозуванню допоміжних фільтруючих засобів

1.3. Характеристики відпрацьованих сорбційних матеріалів харчової промисловості, що використовуються для очищення стічних вод

Відпрацьований кізельгур є одним з основних відходів пивоварної промисловості і повторно не використовується, а складається або скидається в каналізацію. Експериментально визначено [26], що відпрацьований кізельгур містить чистий кізельгур та різні органічні речовини, що осіли на ньому під час фільтрації пива. Після фільтрації пива відпрацьований кізельгур складається із залишків діатомових водоростей та різних органічних сполук: нерозчинних речовин ячмінного солоду та інших матеріалів, клітин пивних дріжджів, білків, високомолекулярних полімерів глюкози та ін. Відпрацьований кізельгур піддають термічній або хімічній регенерації, використовують у сільському господарстві. Відпрацьований кізельгур в основному утилізують на полігонах твердих відходів протягом багатьох років.

Основні розробки по використанню відпрацьованого кізельгуру стосуються його застосовування в сільському господарстві як добрив і добавок в комбікорми, а також у виробництві будівельних матеріалів і компонентів для вироблення фарб і дорожніх покриттів. Проте, відпрацьований кізельгур в останні роки розглядають не у якості відходів, а як вторинну сировину. Відомо [27, 28], що відпрацьований кізельгур після кислотної та лужної активації використовують як адсорбент для очистки стічних вод від гербіцидів та важких металів. Підвищення адсорбційної здатності сорбентів на основі діатоміту пояснюють з ван-дер-ваальсовою взаємодією сорбента з розвиненою поверхнею силікатних мікрокристалів і кулонівською взаємодією позитивно заряджених ділянок поверхні сорбенту з зарядженими і поляризованими молекулами речовин, що сорбуються.

Ефективність відпрацьованого кізельгуру може бути суттєво збільшена фізичними або хімічними методами активування або модифікування його поверхні. При використанні відпрацьованого кізельгуру для очищення стічних вод, що містять іони купруму(II), проведені дослідження по визначенню впливу температури висушування, концентрації луку, температури активації та часу активації на ступінь вилучення іонів купруму(II) із модельних розчинів купрум(II) сульфату.

Дані лабораторних досліджень по впливу дії температури сушіння на ступінь видалення купруму(II) з модельного розчину свідчать, що адсорбційні властивості відпрацьованого кізельгуру найбільше збільшуються внаслідок його висушування при температурі 105 °C (рис. 1.1). Відомо, що при висушуванні за температури 105 °C, концентрації луку 2,5 М і тривалості активації 60 хв при 100°C адсорбційна здатність кізельгуру досягає 98,7%. Відпрацьований кізельгур після кислотної та лужної активації використовують як адсорбент для очистки стічних вод від гербіцидів та важких металів. Проведені дослідження показали, що в модельних розчинах стічних вод, очищених з використанням відпрацьованого кізельгуру, вміст нафти зменшується в багато разів. Відомо, що кізельгур на 87-91% складається

з силіцієм(IV) оксиду, з домішками оксидів алюмінію та заліза. Він використовується як фільтруючий матеріал, але має слабкі адсорбційні властивості.

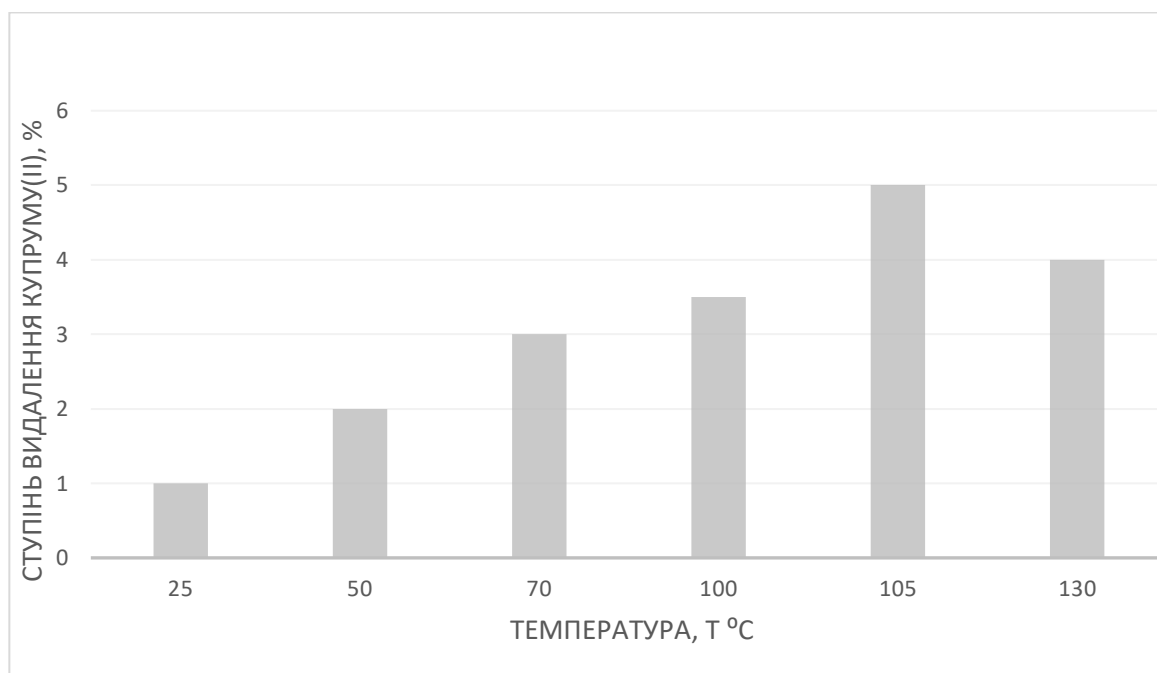


Рис. 1.1. Залежність ступеня видалення купруму(II) від температури висушування відпрацьованого кізельгуру

Tsai разом з співавторами довели, що у відпрацьованого кізельгуру адсорбційна здатність значно вища ніж у чистого. Автори пояснили це наявністю додаткових адсорбційних центрів - органічних речовин, зв'язаних з матрицею кізельгуру. Механізм видалення забруднюючих речовин із стічних вод є досить складним. Деякі вчені [27, 28] пояснюють підвищення адсорбційної здатності глинистих сорбентів з ван-дер-ваальсовою взаємодією сорбента з розвиненою поверхнею силікатних мікрокристалів і кулонівську взаємодію позитивно заряджених ділянок поверхні сорбенту з зарядженими і поляризованими молекулами речовин, що сорбуються. Проведені дослідження по визначенню впливу активатора на адсорбційну здатність відпрацьованого кізельгуру представлені в таблиці 1.2. У випадку термохімічної обробки натрій гідроксидом і амоній гідроксидом, очевидно, таких центрів утворюється найбільше. У випадку активації Трилоном Б – це

комплексоутворення за допомогою молекул комплексону, що прикріпились на поверхні відпрацьованого кізельгуру.

Таблиця 1.2

Вплив природи реагенту та умов активації на адсорбційну здатність
відпрацьованого кізельгуру

№ з/п	Реагент	Умови активації		Адсорбційна здатність, %
		Т, °С	Час, хв	
1	-	-	-	54,00
2	NaOH	105	60	98,70
3	NH ₄ OH	100	60	95,23
4	HCl	100	60	85,12
5	H ₂ SO ₄	100	60	88,98
6	HNO ₃	100	60	90,52
7	Трилон Б	100	60	96,38

Світові запаси кізельгуру та інших природних сорбентів зменшуються. Активоване вугілля є дорогим сорбентом. Таким чином, на сьогодні актуальним є дослідження регенерації, активації і модифікації сорбентів з метою повторного використання відпрацьованих сорбентів в технологіях водоочищення та одержання цінних технічних матеріалів.

1.4. Характеристика адсорбційних властивостей сорбентів та методики їх визначення

Ефективність сорбенту залежить від його фізико-хімічних характеристик: сорбційної ємності (питома поверхня, пористість і розподіл пор за розміром); хімічної природи поверхні (функціональні групи, вибірковість); фізичної міцності і стабільності.

Адсорбційна здатність сорбентів – це здатність поверхні твердої речовини (сорбенту) вибірково поглинати певні речовини (адсорбати) з газу, рідини або розчину та залежить від характеристик сорбенту, таких як питома поверхня та пористість, а також від хімічної природи самого адсорбенту та адсорбату. Мірою адсорбційної здатності сорбентів є кількість конкретної речовини, яка може адсорбуватися одиницею маси адсорбенту. Ця властивість залежить насамперед від розвитку поверхні і може бути збільшена в процесі активації. Визначальними характеристиками сорбентів є адсорбційна здатність, міцність при стиранні, насипна густина, фракційний склад і вміст золи. Переважно сорбційні матеріали характеризуються такими параметрами [29]: щільність: реальна, видима або гравіметрична; пористість шару/гранул; еквівалентний діаметр гранул і площа поверхні одиниці об'єму; гранулометричний склад; механічна міцність.

Залежно від пористості тверді адсорбенти ділять на непористі (питома поверхня $1-500 \text{ м}^2/\text{кг}$) і пористі. Пористі ділять на макропористі, у яких питома поверхня $(0,5-2) \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$, мезопористі з питомою поверхнею $< 4 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{кг}$, мікропористі - питома поверхня $> 4 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{кг}$. Найкращим мікропористим адсорбентом є активоване вугілля та силікагель. Адсорбційна здатність активного вугілля є наслідком сильно розвиненої поверхні і пористості. Питома поверхня активного вугілля становить $500-1000 \text{ м}^2/\text{г}$. Кізельгур (діатоміт), трепел, опока належать до мезопористих адсорбентів. До мікропористих адсорбентів відносять цеоліти.

Питома площа поверхні твердого сорбенту. Адсорбція із рідкої фази в загальному дозволяє визначати питому поверхню, оскільки величина адсорбції знаходиться в простій залежності від питомої поверхні. Однак для цього потрібно знайти залежність кількості адсорбованої речовини від її концентрації в розчині [30, 31]. Від величини питомої поверхні залежать поглинальна здатність адсорбентів, властивості фільтрувальних матеріалів.

Визначають площу питомої поверхні наступним чином: у скляних бюксах із кришками зважують зразки адсорбенту по 1 г. Після цього поміщають

відкриті скляні бюкси з наважками у вакуумну сушильну шафу і висушують за температури 378 К впродовж 2 годин. Після висушування бюкси з наважками зважують із кришками і ставлять в ексикатор, де знаходиться ємність із бенzenом. Бюкси з наважками в ексикаторі мають бути відкритими. Витяжна шафа, в якій знаходиться ексикатор із бенzenом, має бути вимкнена! Через 25 хвилин бюкси зі зразками дістають з ексикатора, вимірюють зміну маси і знову поміщають в ексикатор. Далі аналогічні операції проводять з інтервалом у 15 хвилин. Вимірювання маси проводять до тих пір, поки різниця мас за чотирьох останніх вимірювань не змінюватиметься. Повну адсорбцію визначають вимірюванням маси через 1 добу. Питому площу поверхні ($S_{\text{пит}}$, $\text{м}^2/\text{г}$) розраховують за формулою (1.1):

$$S_{\text{пит}} = \frac{m_{\text{C}_6\text{H}_6} \cdot N_A \cdot S_0}{m \cdot M_{\text{C}_6\text{H}_6}}, \quad (1.1)$$

де $m(\text{C}_6\text{H}_6)$ – маса поглинутої пари бензену, г; N_A – стала Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$); S_0 – площа поверхні, яку займає одна молекула бензену ($39 \cdot 10^{-20}$ м^2); m – маса наважки, г; $M(\text{C}_6\text{H}_6)$ – молекулярна маса бензену (78 г/моль).

Одна і та ж речовина при сорбції великих молекул має меншу питому поверхню, при сорбції дрібних молекул має більшу питому поверхню. Для великих молекул поверхня дрібних пор, виміряна сорбцією дрібних молекул, якби і не існує. Тому, крім питомої поверхні, важливою характеристикою пористих тіл є розподіл поверхні пор за радіусами пор.

Найбільш часто для визначення питомої поверхні по адсорбції з розчинів використовують барвники через простоту методики визначення зміни концентрації. Адсорбція метиленового синього [32] використовується для визначення питомої поверхні різних речовин, що пояснюється простою методикою визначення і широко застосовується для порівняльної оцінки поверхні одного й того самого або подібних матеріалів.

Визначення показника адсорбції за метиленовим блакитним.

Визначення адсорбційної активності за МБ виконують у відповідності до методики [33]. Метиленовий блакитний (МБ) – має широке застосування у

біології та хімії. МБ є гетероциклічною ароматичною хімічною сполукою з хімічною формулою $C_{16}H_{18}N_3SCl$ та молярною масою 319,85 г/моль. Концентрацію барвника визначають на спектрофотометрі Shimadzu UV-2450 при довжині хвилі 663 нм. Кількість сорбованої речовини розраховують за формулою (1.2):

$$MB = \frac{(C_0 - C_x) \cdot V}{m \cdot 1000}, \quad (1.2)$$

де C_0 та C_x – вихідна та рівноважна концентрації метиленового блакитного, мг/дм³; V – об'єм розчину метиленового блакитного (25 см³); m – наважка вугілля (0,1 г).

Визначення показника адсорбції за йодом [9].

Перед початком визначення сорбент висушують у сушильній шафі за температури 100–110 °С протягом 1 год. На технохімічних вагах у конічній колбі об'ємом 200 см³ зважують 1,0 г сорбенту, доливають 100 см³ 0,1 М розчину йоду, закривають і збовтують за допомогою апарату для струшування 30 хвилин. Потім піпеткою відбирають 10 см³ освітленого розчину і титрують розчином натрію тіосульфату в присутності індикатора крохмалю, який додавають наприкінці титрування. Аналогічним чином стандартизують вихідний розчину йоду. Адсорбцію йоду X (мг/г) обчислюють за формулою:

$$X = \frac{(V_1 - V_2) \cdot 0,0127 \cdot 100 \cdot 100}{10 \cdot m} \quad (1.3)$$

де V_1 – об'єм 0,05 М розчину $Na_2S_2O_3$, який витрачено на титрування 10 см³ розчину йоду в КІ, см³;

V_2 – об'єм 0,05 М розчину $Na_2S_2O_3$, який витрачено на титрування 10 см³ розчину йоду в КІ після сорбції, см³;

0,0127 – маса йоду, що відповідає 1 см³ 0,05 М розчину $Na_2S_2O_3$, г;

100 – об'єм розчину йоду в КІ, взятий на визначення сорбційної ємності, см³;

m – маса наважки сорбенту, г.

Статична обмінна ємність (СОЄ). Повна ємність, яка характеризується загальним числом іоногенних груп у мл-екв. на одиницю маси сорбенту. Для визначення статичної обмінної ємності (СОЄ) методом Боема [34, 35] наважки сорбенту (АВ) масою 1 г насипають у конічні колби на 250 см³ з 50 см³ 0,1 М розчинів НСІ, NaOH, Na₂CO₃, NaHCO₃, перемішують за допомогою мішалки протягом на 24 год. Рівноважну концентрацію речовин у розчинах визначають кислотно-основним титруванням стандартними 0,1 М розчинами НСІ та NaOH в присутності індикаторів метилоранжу та фенолфталеїну, відповідно. Катіонну та аніонну СОЄ розраховують за формулою (1.4):

$$\text{СОЄ} = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{1000 \cdot m}, \quad (1.4)$$

де C_0 та C_p – вихідна та рівноважна концентрація розчинів, що використовували для нейтралізації поверхневих груп, мг/дм³. Кількість слабокислотних груп на поверхні АВ розраховують за різницею адсорбції з розчинів карбонату та гідрокарбонату натрію, фенольних – за різницею адсорбції з розчинів гідроксиду та карбонату натрію. Кількість сильнокислотних груп обчислюють за адсорбцією гідрокарбонату натрію. Аніонну СОЄ розраховують за адсорбцією хлоридної кислоти.

РОЗДІЛ 2

ОДЕРЖАННЯ ЕФЕКТИВНИХ СОРБЕНТІВ ІЗ ВІДХОДІВ ВИРОБНИЦТВ

Активоване вугілля і його модифікації досить універсальні по відношенню до різних класів хімічних речовин, що дозволяє очищати воду як від органічних, так і від неорганічних речовин. Активоване вугілля (АВ) та його синтетичні модифікації, як відомо [36], характеризуються більшими сорбційними, іонообмінними та відновними властивостями порівняно з технічними вуглецями, а також підвищеною міцністю, що забезпечує його стабільну роботу та тривале використання. Вартість активованого вугілля висока, тому що процес виготовлення високоякісного активного вугілля складний і тривалий. У зв'язку з цим, необхідно багаторазового використовувати активоване вугілля, або використовувати його як вторинну сировину. Тому застосування активного вугілля для очищення стічних вод стримується економічними чинниками. Пошук ефективних сорбентів для очищення стічних вод йде як в напрямку активованих вуглецевих матеріалів, так і використання дешевого низькосортного вугілля і відходів виробництва без додаткової переробки. Тобто, для очищення промислових стічних вод необхідні найрізноманітніші сорбенти: високочисті і високоємнісні; поглиначі середньої місткості і вибіркової; сорбенти, де більш низька сорбційна ємність і селективність може компенсуватися доступністю і невисокою вартістю.

2.1. Об'єкти дослідження

Об'єктом дослідження був відпрацьований промисловий сорбент виробництва газованих напоїв (АВ + К) [31] (рис. 2.1). До складу зазначеного сумішевого сорбенту (АВ + К) входили кізельгур марок Бекогур 3500 і Бекогур 200 та активоване вугілля марки Деколар А. Кізельгур марки

Бекогур 3500 – це грубий кізельгур (діатомова земля) фіксованого гранулометричного складу, який забезпечує необхідну швидкість та глибину фільтрації, а Бекогур 200 – це кізельгур дуже мілкового гранулометричного складу з високою ефективністю фільтрування. Хімічний склад кізельгуру марок Бекогур 200 та Бекогур 3500 на 90,5-92,5 % представлений SiO_2 . Також в складі є: Al_2O_3 (1,2 %); Fe_2O_3 (0,4 %); MgO (0,8 %); $\text{Na}_2\text{O} / \text{K}_2\text{O}$ (0,4 %) та ін. Активоване вугілля марки Деколар А – високоактивний сорбент з питомою поверхнею адсорбції 1000–1500 $\text{м}^2/\text{г}$, що широко використовується в харчовій промисловості. При цьому АВ – неоднорідний пористий сорбент, в якому значна частина сорбційного об'єму приходить на мікропори. Сама структура складається із аморфних ділянок і кристалітів, як основних елементів сорбційного поля [9].



Рис. 2.1. Загальний вигляд відпрацьованого сорбенту (AB+K).

Також об'єктом дослідження були кавові відходи (шрот) (рис. 2.2). Шрот утворюється після вилучення з мелених кавових зерен водорозчинних речовин. Кавовий шрот – це залишок після заварювання кави. Отримати його дуже просто. При використанні кавоварки кавовий шрот залишиться у фільтрі після того, як вся вода пройде через мелену каву. Найбільш цінними компонентами кавового шроту, придатними для отримання вторинних матеріалів переробки, є масло кави (7...12%), лігноцелюлоза (60...75%), суміш ароматичних речовин (кофеол) - (3 ... 5%), решта - мінеральні (зольні) елементи.



Рис. 2.2. Загальний вигляд кавового шроту.

Хімічний склад кавового шроту представлений в таблиці 2.1, а елементний склад – в таблиці 2.2.

Таблиця 2.1

Хімічний склад кавового шроту

Назва	Вміст, мас. %
білки	8,2
ліпіди (жири)	15,1
целюлоза	61,5
геміцелюлоза	12,9
зольність	1,56

Таблиця 2.2

Елементний склад кавового шроту

Елемент	Вміст, мас. %
C	43,60
H	5,68
N + O	49,42
S	0,005

Об'єктом дослідження були також промивні води електрохімічного міднення, які містили купрум(II)-іони. Як промивні води процесу електрохімічного міднення були досліджені модельні розчини, що відповідали дуже розбавленим кислотним електролітам після використання в процесі міднення [9]. До кислотних електролітів міднення відносять сульфатні, борфторидні, сульфаматні, нітратні, сульфонатні, хлоридні та ін. Найбільше поширення мають сульфатні електроліти. До складу сульфатних електролітів входять купрум(II) сульфат та сульфатна кислота. Вміст купрум(II) сульфату [37] в такому електроліті 150-250 г/дм³. ГДК по Cu²⁺ в стічних водах промивання деталей та виробів міднення становить 0,001 г/дм³.

2.2. Методика регенерації відпрацьованого сорбенту (AB+K)

Регенерацію відпрацьованого сумішевого сорбенту (AB + K) проводили на лабораторній установці, що включала високошвидкісну магнітну мішалку марки VELP AREC (VELP Scientifica, Італія), плоскодонну колбу та зворотний холодильник Лібіха, відповідно до методики [38]. Умови регенерації сумішевого сорбенту представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Умови регенерації сумішевого сорбенту (AB+K)

Стадія процесу	Технологічні параметри			
	Співвідношення (AB + K):розчин	<i>t</i> , °C	<i>τ</i> , год	<i>n</i> , об/хв
Обробка дистильованою водою	1 : 4	50–60	45–60	200
Обробка розчином NaOH	1 : 2	100	45–60	-
Обробка розчином HCl	1 : 2	100	45–60	-

Методика регенерації сорбенту: до 100 г відпрацьованого сумішевого сорбенту додавали 400 см³ дистильованої води та перемішували її на магнітній мішалці. Умови процесу: нагрівання до 50–60 °С , перемішування з інтенсивністю 200 об/хв, час перемішування - 45–60 хв. Потім реакційну суміш охолоджували, фільтрували. Такі операції повторювали кілька разів. Потім суміш сорбентів висушували до постійної маси при 105 °С. Наступною стадією було проведення хімічної активації лугом, або кислотою, або по черговій дії і лугом, і кислотою протягом 45–60 хв. Наступні операції: фільтрування, промивання дистильованою водою до нейтрального значення промивної води (рН=7), висушування суміші сорбентів при 105 °С. Загальний вигляд регенованого сорбенту (АВ+К) представлено на рис. 2.3.



Рис. 2.3. Загальний вигляд регенованого сорбенту (АВ+К)

На поверхні відпрацьованого сорбенту є зола, меланоїдини та продукти їх хімічних перетворень. При регенерації активованого вугілля зола вилучається обробкою розчином хлоридної кислоти. Меланоїдини практично не гідролізуються при дії навіть сильних мінеральних кислот. Обробка розчином NaOH приводить до повного відновлення сорбційної ємності сорбенту). Очевидно, що органічні домішки, що сорбовані на поверхні, при хімічній взаємодії з розчином NaOH утворюють розчинні у воді солі, які активно десорбуються з твердої поверхні. Ефективність активації відпрацьованого сумішевого сорбенту визначали за зміною його сорбційної ємності за йодом [9].

2.3. Методика отримання карбонового сорбенту з кавової гуші

Загальний принцип перетворення кавової гуші на активоване вугілля включає два ключові етапи: карбонізацію (піроліз) та активацію [39]. Блок-схема одержання адсорбентів з кавового шроту представлена на рис. 2.4.

Спочатку кавові відходи промивають дистильованою водою, при температурі 50°C для видалення водорозчинних складових. Потім осад відокремлюють фільтруванням і сушать в сушильній шафі при температурі 105°C протягом 5 годин. Для видалення жирних кислот, необхідно висушений осад обробити гексаном. Далі проводять карбонізацію (піроліз). На цьому етапі органічний матеріал перетворюється на вуглецевий залишок, який називають біовугіллям (або просто вугіллям). Далі сировину нагрівають до високих температур (зазвичай від 350°C до 600°C і вище) в умовах обмеженого доступу кисню (або в інертній атмосфері, наприклад аргону). При цьому відбувається руйнування органічних молекул та видалення летких речовин. Отже, утворюється пористий, багатий на вуглець матеріал - біовугілля.

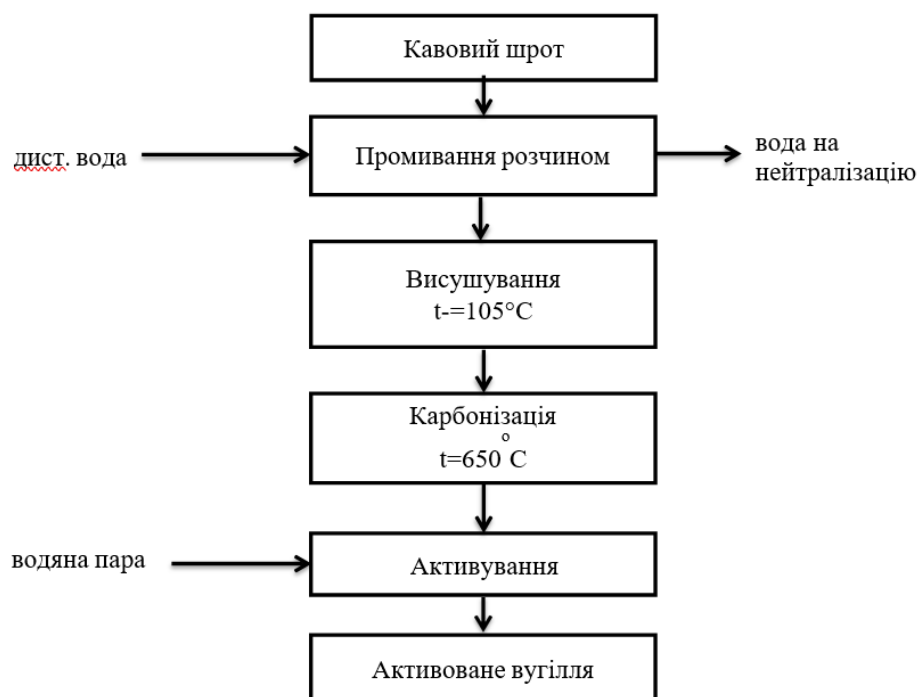


Рис. 2.4. Блок-схема одержання адсорбентів з кавового шроту.

Другий етап – активація. Вона необхідна для створення розвиненої пористої структури та значного збільшення питомої поверхні вугілля, що робить його «активованим» і здатним до високої адсорбції. Методика хімічної активації полягає у змішуванні або просочуванні вугілля активуючим агентом (наприклад, калію гідроксидом (KOH), фосфатною кислотою (H_3PO_4) або цинк хлоридом ($ZnCl_2$)). Потім суміш нагрівають до високої температури (зазвичай нижчої, ніж при піролізі, наприклад, $400^{\circ}C$ – $800^{\circ}C$). Хімічний агент допомагає розширити пори. При обробці вихідної сировини ортофосфатною кислотою з нього частково видаляються речовини, які легко гідролізують у кислому середовищі (крохмаль, пектинові речовини, моно- і дисахариди), целюлоза при цьому теж частково гідролізується, набуваючи властивості мікрокристалічності. При цьому поліпшується пористість і зростає питома поверхня матеріалу. При такій обробці має місце процес етерифікації целюлози фосфатною кислотою. Фізична (парова) активація полягає в нагріванні біовугілля до високих температур (зазвичай $800^{\circ}C$ – $1000^{\circ}C$) і обробці окислювальним газом, таким як водяна пара або вуглекислий газ (CO_2). Газ вибірково реагує з вуглецем, розширюючи наявні пори та створюючи нові, що значно збільшує площу поверхні. Із літературних даних відомо, що здатність адсорбувати молекули йоду у адсорбенту, одержаного із кавового шроту зростає зі збільшенням коефіцієнту просочування (від $X_p=0,5$ до $X_p=1,0$) і максимальне значення досягає 87 % при мікрохвильовій активації.

2.4. Методики адсорбційного очищення промислових стічних вод від купрум(II)-іонів

Метали є найбільш поширеними забруднювачами, які містяться у водних джерелах, і складають велику загрозу для здоров'я і екології в цілому. Іони важких металів є стабільними та стійкими забруднювачами навколишнього середовища, тому що вони не розкладаються та не руйнуються. Важкі метали розглядаються як один із найбільш небезпечних водних

забруднювачів. На сьогоднішній день багато досліджень присвячено видаленню важких металів активованим вугіллям як економічно привабливим та технічно простим засобом. Саме тому для обробки води, забрудненої важкими металами, використовують активоване вугілля.

Ми використали регенований сорбент (AB+K). Відновлення сорбційної ємності сорбенту (AB + K) після регенерації відбувається, в першу чергу, внаслідок перебігу кислотно-основних реакцій та відмиванням водою продуктів їх взаємодії.

Очищення промивних вод процесу міднення від іонів купруму(II) проводили із використанням модельних водних розчинів, які готували розчиненням кристалогідрату купрум(II) сульфату $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Одержані модельні розчини відповідали складам промивних вод гальваніки з концентраціями 1,5-300 мг/дм³. Загальну методику адсорбційного вилучення іонів купруму(II) з води описано авторами в роботах [40, 41]. До 1 г регенованого сумішевого сорбенту (AB + K) додавали 100 см³ модельного розчину купрум(II)-іонів. Одержану суміш перемішували (300-350 об/хв) 30–45 хвилин за $t = 20\text{--}25\text{ }^\circ\text{C}$ та залишали її для остаточного закінчення процесу на одну добу. Суміш фільтрували під вакуумом. Залишкову концентрацію іонів Cu^{2+} [42] у фільтраті визначали методом комплексометричного титрування розчином ЕДТА. Розраховували ступінь вилучення купрум(II)-іонів у % та адсорбцію у мг/г. Результати досліджень представлені в таблиці 2.4.

Отримані результати вказують на низьку ефективність вилучення іонів купруму(II) із модельних розчинів через незначну адсорбцію Cu^{2+} регенованим сумішевим сорбентом (AB + K). Отже, без додаткової модифікації поверхні регенованого сумішевого сорбенту (AB + K) використання даного методу не доцільне.

З метою збільшення адсорбційної ємності, а також розширення спектру сполук, що можуть бути поглинуті поверхнею сорбенту, останню модифікують. При цьому на поверхні модифікованого сорбенту (МП)

утворюються різні функціональні групи, які утворюють міцні зв'язки із забруднювачами різних типів за рахунок хімічної взаємодії.

Таблиця 2.4

Адсорбція купрум(II)-іонів на сумішевому сорбенті (AB + K)

Концентрація Cu^{2+} , мг/дм ³		Ступінь вилучення E , %	Адсорбція мг/г
Початкова C_0	Рівноважна C_p		
1,5	1,44	4,2	0,006
10	9,43	5,7	0,057
30	26,88	10,4	0,312
50	44,20	11,6	0,580
150	115,05	23,3	3,495
300	206,10	31,3	9,390

Для підвищення ефективності вилучення катіонів купруму(II) з гальванічних промивних вод процесу міднення проведено модифікування сорбційної поверхні регенованого сумішевого сорбенту сульфідно-лужними розчинами відповідно до методики, запропонованої в роботі [43]. До 1 г регенованого сумішевого сорбенту через крапельну лійку додавали окремими порціями ($\sim 30 \text{ см}^3$) 12% розчин натрій сульфід. Реакційну масу перемішували швидкісною мішалкою протягом 5–15 хв, після чого відбирали пробу і проводили якісний аналіз реакційної маси на наявність в ній сульфід-іонів [42]. Потім додавали чергову порцію розчину, що містить сульфід-іони з аналогічною послідовністю проведення технологічних операцій. Повне модифікування поверхні сульфід- і гідросульфід-іонами вважали завершеним за наявності в розчині сульфід- і гідросульфід-іонів. Осад сорбенту [(активоване вугілля + кізельгур) + S^{2-} , HS^-] відфільтровували на фільтрі Шотта і висушували. При модифікуванні поверхні ступінь видалення загального сульфуру склав 96-97%. Порівняльний аналіз ступеня вилучення та адсорбції купрум(II)-іонів на регенованому та модифікованому сорбенті

представлено в таблиці 2.5. При порівнянні ступеня вилучення та адсорбції купрум(II)-іонів на регеноерованому та модифікованому сорбенті прийшли до висновку, що попереднє модифікування поверхні сорбенту більш активними сульфід- та гідросульфід-іонами [40, 41] дозволило збільшити ступінь вилучення катіонів купруму(II) із промивних гальванічних вод процесу міднення на 60%, а адсорбцію в 78 разів (таблиця 2.5).

Таблиця 2.5

Порівняльний аналіз ступеня вилучення та адсорбції купрум(II)-іонів з розчину з $C(\text{Cu}^{2+})=150 \text{ мг/дм}^3$ на регеноерованому та модифікованому сорбенті

Зразок	Ступінь вилучення, %	Адсорбція, мг/г
Регеноерований сорбент (РС)	23,3	3,5
Модифікований сорбент (МС)	83,2	273,2

При порівнянні ступеня вилучення та адсорбції купрум(II)-іонів на регеноерованому та модифікованому сорбенті прийшли до висновку, що попереднє модифікування поверхні сорбенту більш активними сульфід- та гідросульфід-іонами [40, 41] дозволило збільшити ступінь вилучення катіонів купруму(II) із промивних гальванічних вод процесу міднення на 60%, а адсорбцію в 78 разів (таблиця 2.5). ІЧ-спектральними та рентгенофазовими дослідженнями встановлено, що на поверхні модифікованого сорбенту (МС) відбуваються топохімічні реакції утворення купрум(II) сульфідів та елементарної сірки [9]. Модифікований сорбент (МС) разом із CuS та S досліджено як активний компонент пластичних мастил спеціального призначення [44].

Кавовий шрот є придатною сировиною для використання в якості біосорбенту для видалення важких металів з водних розчинів [45]. Адсорбція

іонів купруму(II) досягає значення 6 мг/г. Це говорить про перспективність використання вугілля з кавового шроту для видалення іонів купруму(II). Адсорбент з кавового шроту характеризується наявністю мікро- і мезопор з ефективним радіусом 2 нм. Величина питомої поверхні досягає 835 м²/г. Сорбційна здатність АВ, отриманих в області оптимальних режимів активування (850°C), по метиленовим блакитному становить 225 мг/г. Сорбційна активність по йоду досягає 65%. Отримані сорбційні матеріали виявляють сорбційну активність по відношенню до іонів важких металів, зокрема купруму(II). Завдяки високим значенням параметрів пористої структури адсорбенти можуть бути широко використані в процесах очищення стічних вод від важких металів. Ефективність використання таких адсорбентів зумовлена великою кількістю мікро- і мезопор, які сприяють дифузії забруднювачів.

РОЗДІЛ 3

ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У ШКІЛЬНОМУ КУРСІ ХІМІЇ

3.1. Методичні аспекти інтеграції результатів досліджень сорбентів, отриманих з відходів, у шкільний курс хімії

Невпинний розвиток економіки спонукає до впровадження великої кількості нових технологій [46]. Важливим завданням сучасного суспільства є як скорочення обсягів утворення відходів, так і використання вже накопичених, зокрема, для отримання нових сорбційних матеріалів та інших корисних нетоксичних продуктів різного призначення. Харчова промисловість є одним з найбільших споживачів активованого вугілля, кізельгуру, а також низки інших сорбентів, які після відпрацювання, в основному, утилізують на полігонах твердих відходів. Загальноприйнята європейська практика передбачає повторне використання відходів рослинництва, зокрема, для виробництва кормів, добрив, паливних палет, продуктів екологічного, медичного або харчового призначення. Крім того, на очистку питної, технологічних і стічних вод, необхідна велика кількість карбонових сорбентів, що зумовлено різким збільшенням останнім часом забруднення водного басейну побутовими і промисловими стоками. При очищенні води активоване вугілля може використовуватися як на стадії попереднього видалення забруднювачів, так і для доочищення після попереднього очищення іншими способами.

Вивчення теми «Одержання сорбентів із відходів виробництв та їх практичне значення» у шкільному курсі хімії є надзвичайно актуальним і важливим з кількох ключових причин, які стосуються екології, економіки, сталого розвитку та практичної хімії. Інтеграція результатів досліджень сорбентів, отриманих з відходів, у шкільний курс хімії є актуальним та ефективним способом підвищення пізнавального інтересу учнів, формування

їхньої екологічної свідомості та демонстрації практичного застосування хімічних знань.

Основними методичними аспектами такої інтеграції є: екологізація змісту навчання (включення матеріалу про сорбенти з у такі теми, як «Розчини. Суспензії. Емульсії», «Колоїдні системи. Явища адсорбції», «Очищення води», «Охорона навколишнього середовища»); акцент на проблемах: використання прикладів із життя для ілюстрації проблеми забруднення довкілля та ролі сорбентів у його очищенні, наприклад стічних вод; принцип «зеленої хімії»: демонстрація того, як перетворення відходів на корисні сорбенти відповідає принципам сталого розвитку та мінімізації відходів.

Прикладне значення хімії та екології показують демонстраційні експерименти. Ці експерименти мають бути наочними та безпечними. Демонстрація очищення: показати процес очищення забарвленого водного розчину (наприклад, метиленового синього, йоду, купрум(II) сульфату) за допомогою сорбенту, виготовленого з відходів. Методична мета: Візуалізація принципу адсорбції та демонстрація практичного застосування «хімії відходів». Порівняння ефективності: демонстрація різниці в очисній здатності комерційного активованого вугілля та сорбенту, отриманого з відходів, для однієї і тієї ж забруднюючої речовини. Методична мета: формування навичок хімічного порівняльного аналізу та оцінки економічної доцільності.

Практична та дослідницька діяльність. Лабораторні роботи та практикуми спрямовані на набуття учнями практичних навичок роботи з речовинами та обладнанням, а також на розвиток дослідницьких компетенцій. Наприклад, *Лабораторна робота* «Виготовлення сорбенту»: проведення простої процедури термічної обробки органічних відходів (наприклад, подрібненої деревини чи лушпиння) для отримання вуглецевого сорбенту (можна обмежитися карбонізацією).

Розділ курсу: «Вуглець та його сполуки», «Неорганічна хімія». Практична робота «Визначення сорбційної ємності»: визначення кількості

забруднюючої речовини (наприклад, йоду), яку може поглинути певна маса отриманого сорбенту.

Навчальні проекти. Забезпечують глибоке занурення в тему, розвивають навички планування, аналізу та презентації.

Таблиця 3.1.

Типи проектів, які можуть бути запропоновані в шкільному курсі хімії

Тип проекту	Опис та методична мета
Екологічний проект	Дослідження місцевих відходів (Харчова промисловість АПК, деревообробка) як потенційних джерел сорбентів.
Технологічний проект	Розробка детальної (хоча б теоретичної) технологічної схеми перетворення обраних відходів на сорбенти.
Маркетинговий проект	Оцінка економічної ефективності використання сорбентів, отриманих з відходів, порівняно з комерційними аналогами.
Міждисциплінарний проект	Хімія + Екологія + Біологія: Дослідження впливу очищення води отриманим сорбентом на живі організми (наприклад, на проростання насіння).

Інтеграція в теоретичний матеріал. Включення практичних результатів досліджень сорбентів у викладання базових хімічних понять у темах:

- Тема «Розчини та дисперсні системи»: Використання адсорбції як прикладу поверхневих явищ, що відбуваються на межі фаз;
- Тема «Окисно-відновні реакції»: Обговорення активації вуглецевих сорбентів (хімічна активація) як приклад хімічних перетворень;
- Тема «Хімія і довкілля»: Сорбенти з відходів як яскравий приклад «зеленої хімії» та циркулярної економіки.

Структура уроку

1. Вступ (10 хв)

- Обговорення актуальності проблеми відходів, їх впливу на довкілля.
- Пояснення, що таке поводження з відходами з точки зору хімії (перетворення речовин).

2. Основна частина (30 хв)

- Класифікація відходів. Розглянути класифікацію за: походженням (відходи виробництва, побутові відходи); небезпечністю; категорією.
- Хімічні аспекти утилізації: обговорити різні методи утилізації та їхні хімічні процеси (наприклад, спалювання, хімічна нейтралізація, біологічна переробка); проаналізувати склад різних видів відходів та їхню хімічну активність.
- Переробка: навести приклади хімічних процесів, що застосовуються при переробці відходів.

3. Дискусія (10 хв). Обговорити хімічні експерименти, які можна провести в класі.

4. Висновки (5 хв)

- Підсумувати основні аспекти поводження з відходами.
- Наголосити на ролі кожного учня в процесі зменшення забруднення довкілля.

Матеріали для уроку

- Презентація з ілюстраціями процесів утилізації відходів.
- Зразки різних видів відходів (відпрацьовані сорбенти).
- Хімічні прилади для демонстраційних експериментів.

3.2. Проект «Рециклінг твердих відходів промисловості»

Мета проекту: Розкрити, проаналізувати та відзначити практичне значення рециклінгу.

Завдання: Розкрити поняття рециклінгу, його види та використання; обґрунтувати необхідність впровадження рециклінгу в процес управління

відходами; висвітлити основні проблеми впровадження рециклінгу та запропонувати шляхи їх вирішення; визначити оптимальні для України проекти розвитку рециклінгу.

Рециклінг – один із варіантів переробки відходів. Він є одним із популярних методів утилізації відходів. Рециклінг включає два основні процеси: повторне використання матеріалів і повернення їх до виробничого циклу. Завдяки йому легше боротися зі збільшенням обсягу та кількості звалищ. Завдяки такому процесу зменшується навантаження на природні ресурси. Вартість готової продукції можна знизити за рахунок скорочення витрат на логістику — сировину не потрібно везти з іншого регіону або навіть країни. Переваги рециклінгу: зменшення площі звалищ, звільняється земля для інших потреб; повернення вторинної сировини у виробництво зменшує потребу у нових ресурсах; зниження вартості товарів.

Економічні та екологічні переваги рециклінгу. Рециклінг має численні економічні та екологічні переваги. Він дозволяє зекономити кошти на видобутку та обробці первинної сировини, знижує енергоспоживання та шкідливі викиди у виробництві. Окрім того, рециклінг створює нові робочі місця та сприяє сталому розвитку суспільства. З екологічної точки зору, рециклінг зменшує навантаження на довкілля, скорочує кількість відходів на сміттєвих полігонах, зберігає природні ресурси та біорізноманіття. Таким чином, рециклінг відіграє ключову роль у переході до більш екологічно-свідомого способу життя. Рециклінг - це невід'ємна частина сучасної системи поводження з відходами, яка має численні переваги як для довкілля, так і для економіки. Впровадження ефективних програм рециклінгу дозволяє зменшити кількість відходів на полігонах, заощадити природні ресурси та створити нові «зелені» робочі місця. Для успішного впровадження рециклінгу в Україні необхідно запровадити чітке законодавче регулювання, розвинути інфраструктуру збору й сортування, забезпечити підтримку бізнесу та підвищити екологічну свідомість громадян. Лише за таких умов Україна

зможє стати прикладом переробки відходів та переходу до циркулярної економіки.

На рис. 3.1 наведена схема використання регенованого сорбенту в комбінованому водоочищенні стічних вод від промислових забруднювачів.

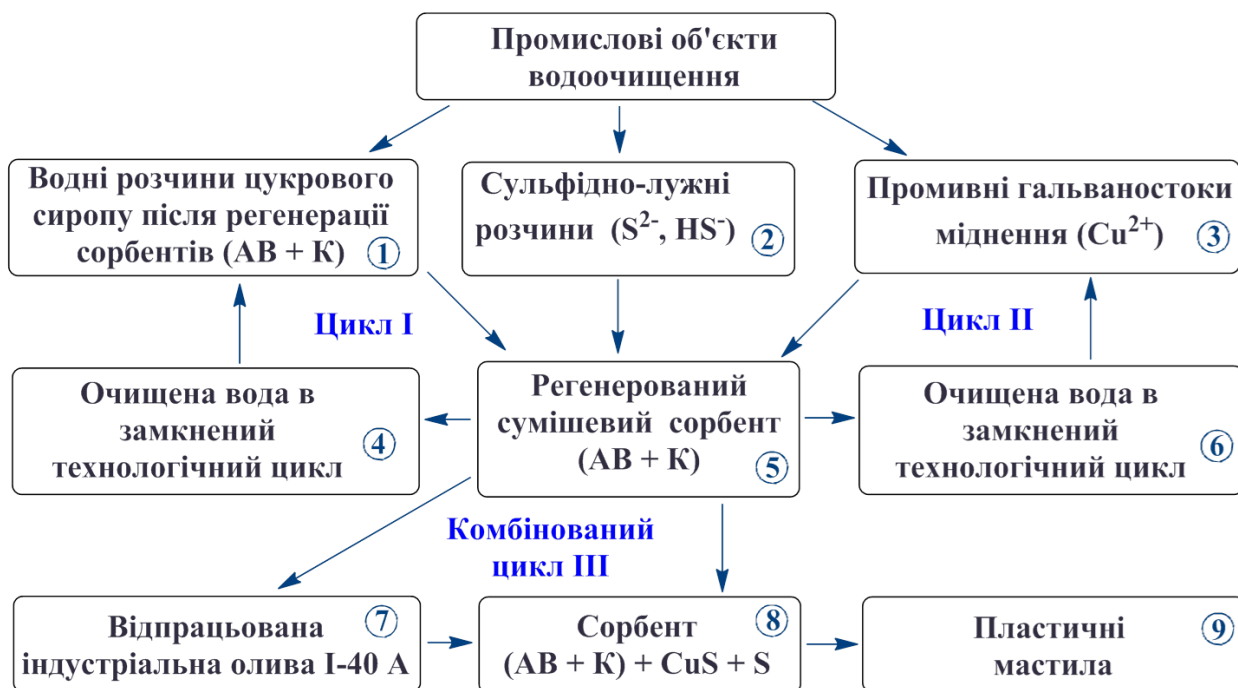


Рис. 3.1. Схема використання регенованого сорбенту в комбінованому водоочищенні стічних вод від промислових забруднювачів

Всі запропоновані об'єкти дослідження розглядаються як вторинна промислова сировина. Рециклінг включає регенерацію відпрацьованого сорбенту та використання його для очищення стічних вод, зокрема вилучення Cu^{2+} , S^{2-} , HS^- -іонів на основі принципів «зеленої хімії» (US Department of Energy, DOE), дослідження циклічних процесів (цикли I–III) та можливого використання очищеної води в оборотних технологічних циклах окремих виробництв, а також отримання пластичних мастил як кінцевої продукції комплексного процесу.

3.3. Лабораторна робота «Регенерація відпрацьованого сорбенту виробництва газованих напоїв та визначення сорбційної ємності за йодом»

Характеристика сорбенту:

Як відпрацьований сорбент використовували суміш активованого вугілля марки «Деколор А» та кізельгуру «Бекогур 200» і «Бекогур 3500» (виробництва E. Begerow GmbH & Co (Німеччина)) у співвідношенні 2:3, відібрані на підприємстві з виробництва газованих напоїв «Панда» (м. Вінниця, Україна).

Реактиви:

- вода дистильована,
- натрій гідроксид (NaOH, х.ч., Україна),
- хлоридна кислота (HCl, 36-38%, Україна),
- йод (I₂, х.ч., Чилі),
- калій йодид (KI, х.ч, Індія),
- натрію тіосульфату пентагідрат (Na₂S₂O₃·5H₂O, х.ч., Україна),
- крохмаль ((C₆H₁₀O₅)_n, х.ч., Україна).

Обладнання:

- хімічні стакани (100, 800 см³);
- аналітичні ваги AS 220.R2 (RADWAG, Poland);
- високошвидкісна магнітна мішалка VELP AREC (VELP Scientifica, Італія);
- сушильна шафа;
- бюретка;
- мірний циліндр;
- мірні піпетки;
- фільтри;
- мірні колби;
- колби для титрування.

Хід роботи:

До 100 г відпрацьованого сорбенту додають 400 мл води. Суміш перемішують на магнітній мішалці при температурі 50-60 °С протягом 45-60 хв. Далі суміш фільтрують і повторюють ці операції. Після висушування при температурі 100 °С зразок кип'ятять в 1 %-ому розчині NaOH протягом 45-60 хв, потім кип'ятять в 4 %-ому розчині HCl протягом 45-60 хв. На заключному етапі зразок промивають водою до рН=7, висушують при температурі 100 °С.

Визначення сорбційної ємності сорбенту (йодне число)

Перед початком визначення сорбент висушували у сушильній шафі за температури 100–110 °С протягом 1 год. На технохімічних вагах у конічній колбі об'ємом 200 см³ зважували 1,0 г сорбенту, доливали 100 см³ 0,1 М розчину йоду, закривали і збовтували на апараті для струшування 30 хвилин. Потім піпеткою відбирали 10 см³ освітленого розчину і титрували розчином натрію тіосульфату в присутності індикатора крохмалю, який додавали наприкінці титрування. Аналогічним чином стандартизували вихідний розчину йоду. Адсорбцію йоду X (мг/г) обчислювали за формулою:

$$X = \frac{(V_1 - V_2) \cdot 0,0127 \cdot 100 \cdot 100}{10 \cdot m} \quad (2.1)$$

де V_1 – об'єм 0,05 М розчину Na₂S₂O₃, який витрачено на титрування 10 см³ розчину йоду в KI, см³;

V_2 – об'єм 0,05 М розчину Na₂S₂O₃, який витрачено на титрування 10 см³ розчину йоду в KI після сорбції, см³;

0,0127 – маса йоду, що відповідає 1 см³ 0,05 М розчину Na₂S₂O₃, г;

100 – об'єм розчину йоду в KI, взятий на визначення сорбційної ємності, см³;

m – маса наважки сорбенту, г.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження було досягнуто поставленої мети – розроблено методику одержання ефективних сорбентів на основі відходів виробництв (відпрацьованих сорбентів після очистки цукрового сиропу і відходів кави - кавового шроту), визначено адсорбційну здатність регенованого та модифікованого сорбенту на основі активованого вугілля та кізельгуру, а також активованого сорбенту на основі кавового шроту щодо іонів важких металів, зокрема купрум(II)-іонів та обґрунтовано можливості інтеграції цих результатів у навчальний процес з хімії.

На основі проведеного літературного та патентного огляду відомих сорбційних матеріалів на основі відпрацьованих активованого вугілля та кізельгуру, які використовують в сучасних технологіях очищення стічних вод, проведено аналіз методів одержання сорбентів та визначення адсорбційних характеристик. Встановлено, що попередня кислотно-лужна регенерація відпрацьованого сорбенту дозволяє збільшити сорбційну активність по йоду до 60%. Величина питомої поверхні досягає $1000 \text{ м}^2/\text{г}$. Адсорбція іонів купруму(II) досягає значення $3,5 \text{ мг/г}$. Встановлено, що модифікування поверхні сорбенту (AB+K) більш активними сульфід- та гідросульфід-іонами дозволяє збільшити ступінь вилучення катіонів купруму(II) із промивних гальванічних вод процесу міднення на 60%, а адсорбцію збільшити в 78 разів.

Встановлена можливість використання сорбентів на основі відходів рослинної сировини для очистки промислових стічних вод від важких металів. Для створення розвиненої пористої структури та значного збільшення питомої поверхні вугілля необхідна хімічна активація. При обробці вихідної сировини ортофосфатною кислотою з нього частково видаляються речовини, які легко гідролізують у кислому середовищі (крохмаль, пектинові речовини, моно- і дисахариди), целюлоза при цьому теж частково гідролізується, набуваючи властивості мікрокристалічності. При цьому поліпшується пористість і зростає питома поверхня матеріалу. Кавовий шрот є придатною сировиною для використання в якості біосорбенту для видалення важких металів з водних

розчинів Адсорбція іонів купруму(II) досягає значення 6 мг/г. Це говорить про перспективність використання вугілля з кавового шроту для видалення іонів купруму(II). Величина питомої поверхні досягає 835 м²/г. Сорбційна активність по йоду досягає 65%.

Запропоновано вивчення одержання сорбентів із відходів виробництв та їх практичне значення в шкільному курсі хімії (демонстраційні досліди, лабораторні роботи, проекти та ін.). Розроблено методичні рекомендації до проведення уроків та практичних робіт для 9-11 класів, які дозволяють продемонструвати принципи сорбції та проблему екології та утилізації відходів. Інтеграція результатів досліджень сорбентів, отриманих з відходів, у шкільний курс хімії є актуальним та ефективним способом підвищення пізнавального інтересу учнів, формування їхньої екологічної свідомості та демонстрації практичного застосування хімічних знань. Основними методичними аспектами такої інтеграції є: екологізація змісту навчання; акцент на проблемах: використання прикладів із життя для ілюстрації проблеми забруднення довкілля та ролі сорбентів у його очищенні, наприклад стічних вод; принцип «зеленої хімії»: демонстрація того, як перетворення відходів («сміття») на корисні сорбенти відповідає принципам сталого розвитку та мінімізації відходів. Перетворення відходів на корисні сорбенти дозволяє одночасно утилізувати відходи та одержати матеріал, необхідний для очищення забруднених середовищ (наприклад, видалення важких металів або органічних барвників зі стічних вод). Це сприяє концепції циклічної економіки.

Тема відкриває учням шлях до розуміння науково-дослідної діяльності та інновацій. Це стимулює інтерес до хімічної інженерії, матеріалознавства, екології та біотехнологій — професій майбутнього. Це сучасний тренд у науці, який може надихнути учнів на вибір відповідної спеціальності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Власенко І.В., Постова В.В. Аналіз сучасних інноваційних методів утилізації відходів. *Економіка і організація управління*, № 3 (39), 2020, С. 30-40.
2. Запольський А.К., Салюк А.І. Основи екології: підручник. Київ: Вища Школа. 2010. 399 с.
3. Malovanyu, M.; Palamarchuk, O.; Trach, I.; Petruk, H.; Sakalova, H.; Soloviy, Ch.; Vasylynych, T.; Tymchuk, I.; Vronska, N. Adsorption extraction of chromium ions (III) with the help of bentonite clays. *Journal of Ecological Engineering*, 2020, 21(7), pp. 178-185. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/125545>
4. El Sayed, E. E. Natural Diatomite as an Effective Adsorbent for Heavy Metals in Water and Wastewater Treatment (a Batch Study). *Water Science*, 2018, 32, pp.32-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.02.001>
5. Chouchane, T.; Boukari, A.; Khireddine, O.; Chibani, S.; Chouchane, S. Cu (II) removal from aqueous medium using blast furnace slag (bfs) as an effective adsorbent. *Eurasian Journal of Chemistry*, 2023, 110(2), pp.115-130. DOI: <https://doi.org/10.31489/2959-0663/2-23-3>
6. Khudoiarova O. Establishing the possibility of reusing the spent sorbent of the food industry. *Устойчивое развитие: современные теории и лучшие практики: материалы Международной научно-технической конференции*, Таллин, Teadmus OÜ, 2022, P.96-98.
7. Тарасенко Ю. О., Зарубицька Л. І., Копил С. А. Відновна сорбція міді на синтетичному активному вугіллі. *Наукові записки*. Том 19. Хімічні науки і технології. Київ, 2001. С.45-47.
8. Худоярова О.С., Гордієнко О.А., Сидорук Т.І. та ін. Модифікація поверхні сумішних сорбентів сульфід-іонами для очищення гальванічних промивних вод процесу міднення. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря*

- Сікорського».* Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2020, 2(19), С. 36–46.
9. Худоярова О.С. Комплексне сорбційне очищення промислових стічних вод від сульфід- та купрум(II)-іонів: дис.... к.т.н. – спец. 05.17.21. – технологія водоочищення: Вінниця, ВДПУ, 2021. 170 с.
 - 10.Свергузова С.В. Использование шлака Оскольского электрометаллургического комбината для очистки сточных вод ионов тяжелых металлов (Ni^{2+} , Cu^{2+}). Сотрудничество для решения проблемы отходов: матер. II Междунар. конф. Харьков, 2005. С. 214 - 218.
 - 11.Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року/ Закон України від 21 квітня 2011 року. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#Text>.
 - 12.Petrova M.A., Krip I.M., Flowers A.G, Shimchuk T.V., Petrushka I. Sorption of Sr on clay minerals modified with ferrocyanides and hydroxides of transition metals. *Radiochemistry*. 2008. Vol. 50. Issue 5. P. 502–507.
 - 13.Петрова А.М., Войтович М.О. Адсорбційне очищення мідєвмісних стоків на бентоніті Язвівського родовища сірки. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 5/10(71), 2014. С. 11-15. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.27345.
 - 14.Сакалова Г.В. Дослідження сорбційного вилучення іонів Купруму (II) з води глинами Черкаського родовища. *Вісник Хмельницького національного університету*. №1, 2013.С. 269-271.
 - 15.Sudaryanto Y, Hartono SB, Irawaty W, Hindarso H, Ismadji S. High surface area activated carbon prepared from cassava peel by chemical activation. *Bioresour Technol* 2006;97(5):734–9).
 - 16.Chuah T.G., Jumasiah A., Azni I., Katayon S., Thomas Choong S.Y. Rice husk as a potentially low-cost biosorbent for heavy metal and dye removal: an overview. *Desalination*, 175 (2005) 305-316.
 - 17.Qaiser S., Saleemi A.R., Ahmad M.M. *Environ. Biotechnol*. 2007. V. 10 P. 409-416.

18. Jones D. A., Lelyveld T. P., Mavrofidis S. D. et al. Microwave heating applications in environmental engineering - a review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2002. Vol. 34, No 2. P. 75–90.
19. Єлатонцев Д. О., Мухачев А. П., Супрунчук В. І. Сорбент лігноцелюлозний зі шкарлупи волоського горіха. *Науковий вісник НЛТУ України*, **2019**, т. 29, № 1. с.110-115.
20. Ковальчук А. І., Почечун Т. П., Галиш В. В., Трус І. М. Фосфорилування шкарлуп волоських горіхів для підвищення ефективності очищення водних розчинів. *Технічні науки та технології* № 2 (12), 2018. с. 236-244.
21. Хоботова Е.Б., Грицай К. Аспекти використання активованого вугілля як сорбенту. Міжнародна науково-практична конференція за участю молодих науковців «ГАЛУЗЕВІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ – 2023». 26 жовтня 2023 р., Харків. С. 163-166.
22. Грабовська О. В., Штангеева Н. І., Українець А. І. Адсорбційне очищення гідролізатів крохмалю у крохмале-патоковому виробництві. *Наукові записки НаУКМА : Природничі науки*. Т. 22, ч. 3. 2023. С. 436-439.
23. Вітенько Т., Зарецька Т., Коцюбка В. Застосування адсорбентів у харчовій промисловості. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль. 2010. С. 124.
24. Поперечний А.М. Процеси і апарати харчових виробництв. К.: Центр учбової літератури, 2007. 301 с.
25. Романова З.М. Стійкість пива: формування якості пива в процесі виробництва. Огляд способів підвищення стійкості пива. *Beer. Technologies&Innovations*. 2020. №2.
26. Russ W., Mortel H., Meyer-Pittroff R., Babeck A. Kieselguhr sludge from the deep bed filtration of beverages as a source for silicon in the production of calcium silicate bricks. *J. Eur. Ceram. Soc.* V. 26. 2006. P. 2547–2559.

27. Tsai W.T., Hsien K.J., Yang J.M. Silica adsorbent prepared from spent diatomaceous earth and its application for removal of dye from aqueous sol *J. Colloid Interface Sci.* 2004. V. 275. P. 428–433.
28. Tsai W.T., H.C. Hsu, T.Y. Su, K.Y. Lin, C.M. Lin Removal of basic dye (methylene blue) from wastewaters utilizing beer brewery waste *J. Hazard. Mater.* 2008. 154. P. 73–78.
29. Сабадаш В.В. Теоретичні основи сорбційних процесів на природних та синтетичних сорбентах: дис. на здобуття наукового ступеня д.т.н. за спеціальністю 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології». Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2019. 472 с.
30. ДСТУ ISO 9277:2015 Визначення питомої площі поверхні твердих часток за допомогою адсорбції газу. Метод Брунауера, Еммета і Теллера (метод BET) (ISO 9277:2010, IDT).
31. Солдаткіна Л. М. Адсорбенти та адсорбційні процеси (очистка природних та стічних вод): Практикум для студентів хімічних спеціальностей закладів вищої освіти. Одеса: ОНУ ім. І. І. Мечникова, 2021. 100 с.
32. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Поверхневі явища та дисперсні системи» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 161 – Хімічні технології та інженерія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023, 42 с.
33. J. Avom. Adsorption of methylene blue from an aqueous solution on to activated carbons from palm-tree cobs. *Carbon.* 1997. Vol. 35(3). P. 365–369.
34. Itodo A. U., Abdulrahman F. W., Hassan L. G. et al. Application of methylene blue and iodine adsorption in the measurements of specific surface area by four acid and salt treated activated carbons. *New York Science Journal.* 2010. № 3. P. 25–33.
35. Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon ASTM D4607-94. 2006. 5 p.

36. Садова М.М. Модифікування енергетичного стану нанопористого біовуглецю для адсорбентів і електродів суперконденсаторів: дис. на здобуття наукового ступеня к.т.н. за спеціальністю 01.04.07 – Фізика твердого тіла. Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.
37. Нестер А. А., Корчик Н. М., Баран Б. А. Стічні води підприємств та їх очищення : монографія. Хмельницький : ХНУ, 2008. 171 с.
38. Ранський А.П., Худоярова О.С., Гордієнко О. А., Крикливий Р.Д. Спосіб регенерації суміші активованого вугілля та кізельгуру від органічних забруднювачів. *Патент України* № 134391 МПК (2017.01), (2006.01)/ 10.05.2019.
39. Vandevivere, P.C., Bianchi, R., Verstraete, W. 1998. Treatment and reuse of wastewater from the textile wet-processing industry: review of emerging technologies. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 72, pp. 289-302.
40. Khudoiarova O., Blazhko O., Blazhko A. Evaluation of the Efficiency of the Reuse of Sorbents and their Modified Forms for the Removal of Copper Ions from Water. *Orbital: Electron. J. Chem.* 2025, 17(1), pp.100-106. DOI: <http://dx.doi.org/10.17807/orbital.v17i1.22002>
41. Khudoiarova O., Blazhko O., Blazhko A. Using of Waste Sorbent from Food Industry for the Removal of Copper Ions from Water. *Chemistry Journal of Moldova. General, Industrial and Ecological Chemistry.* 2025, 20(1), pp.95-99. DOI: <https://doi.org/10.19261/cjm.2025.1250>
42. Худоярова О.С. Аналітична хімія. Кількісний аналіз: навчальний посібник для студентів педагогічних закладів вищої освіти, які навчаються за спеціальністю 102 Хімія, 014.06 Середня освіта (Хімія), 014.05 Середня освіта (Біологія), 091 Біологія, 014.15 Середня освіта (Природничі науки). Вінниця: ВДПУ, 2022. 124 с.
43. Худоярова О.С., Гордієнко О.А., Сидорук Т.І., Тітов Т.С., Ранський А.П. Модифікація поверхні сумішних сорбентів сульфід-іонами для очищення гальванічних промивних вод процесу міднення. *Вісник Національного*

технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». *Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2020. № 2(19). С. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2020.208054>

44. Khudoiarova O., Blazhko O., Blazhko A. Receiving of new carbon-sulfur-containing plastic lubricants based on regenerated products and used sorbents. *Key Engineering Materials*. 2023, 944, pp. 51-58. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-8hu326>
45. Сич Н.В., Клушко А.І., Овсянкіна В.О. Переробка відходів виробництва кави у високопористий сорбційний матеріал шляхом хімічного активування ортофосфорною кислотою. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (23 травня 2019 р., м. Київ) / Укладач Д. Е. Бенатов. К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2019. с. 78-79.
46. Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні. Постанова кабінету міністрів України від 30 квітня 2024 року № 476. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/476-2024-%D0%BF#Text>