

Київський національний університет  
технологій та дизайну

КОЛЕКТИВНА

# МОНОГРАФІЯ

Інноваційні матеріали та технології:  
**БІОТЕХНОЛОГІЯ,  
ПРИКЛАДНА ХІМІЯ,  
ЕКОЛОГІЯ**

ТОМ II



Київ 2025

Ministry of Education and Science of Ukraine

Kyiv National University of Technologies and Design  
Faculty of Chemical and Biopharmaceutical Technologies

**ADVANCED MATERIALS AND TECHNOLOGIES:  
BIOTECHNOLOGY, APPLIED CHEMISTRY,  
ECOLOGY**

COLLECTIVE MONOGRAPH

Volume II

УДК 001.895-03:[608.32:502.131.1:54-027.22

I-66

*Рекомендовано до видання  
Вченою радою Київського національного університету  
технологій та дизайну МОН України  
Протокол № 5 від 23 грудня 2025 р.*

**Рецензенти:**

**Бессарабов Володимир Іванович** – доктор технічних наук, професор, директор Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України

**Мережко Ніна Василівна** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри товарознавства та митної справи Державного торговельно-економічного університету

I-66 Інноваційні матеріали та технології: біотехнологія, прикладна хімія, екологія: колективна монографія. Т. 2; за заг. ред. Мокроусової О. Р., Плаван В. П., Київ: КНУТД, 2025. 340 с.

**ISBN 978-617-7763-61-0**

У колективній монографії представлено результати сучасних наукових пошуків та практичні здобутки у сферах біотехнологій, хімічної інженерії та екологічної безпеки. Книга орієнтована на широке коло фахівців – від студентів профільних спеціальностей до досвідчених науковців та галузевих експертів.

*Публікується в авторській редакції*

УДК 001.895-03:[608.32:502.131.1:54-027.22

ISBN 978-617-7763-61-0

© О. Р. Мокроусова, В. П. Плаван, 2025

© КНУТД 2025

*Recommended for publication  
By the Academic Council of Kyiv National University  
of Technologies and design of Ministry of Education and Science of Ukraine  
Protocol № 5 dated December 23 2025*

**Reviewers:**

**Volodymyr Bessarabov** – Doctor of technical sciences, Professor, Director of the L.M. Lytvynenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry

**Nina Merezko** – Doctor of Sciences, Professor, Head of the Department of Commodity Science and Customs Affairs of State University Of Trade And Economics

I-66 Advanced materials and technologies: biotechnology, applied chemistry, ecology: Collective monograph. Vol. 1; edited by Mokrousova O. R., Plavan V. P., Kyiv: KNUTD, 2025. 340 p.

**ISBN 978-617-7763-57-3**

This collective monograph presents the results of contemporary scientific research and practical achievements in the fields of biotechnology, chemical engineering, and environmental safety. The book is intended for a wide range of specialists, from students in relevant fields to experienced scientists and industry experts

*Published in the author's version*

## 2.8 ВИКОРИСТАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО СОРБЕНТУ ХАРЧОВОГО ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Худоярова О. С.

Вінницький державний педагогічний університет  
ім. М. Коцюбинського, Україна  
olha.khudoiarova@vspu.edu.ua

*Робота присвячена вирішенню питання поводження з відходами сорбентів харчової промисловості, визначенню можливості повторного їх використання в технологіях очищення стічних вод. Проблема накопичення відпрацьованих сорбентів частково вирішується шляхом відновлення їх сорбційних властивостей через регенерацію та модифікацію для використання в технологіях очищення стічних вод промислових виробництв від сульфід- і гідросульфід-іонів та купрум(II)-іонів з повторним використанням очищеної води в замкнених виробничих циклах та одержанням цінних технічних продуктів.*

**Ключові слова:** відпрацьований сорбент, регенерація, модифікація, повторне використання, очищення стічних вод.

Охорона навколишнього середовища і раціональне використання природних ресурсів відноситься до однієї з глобальних проблем сучасності. Для багатьох країн світу гостро стоїть проблема утилізації відходів. Важливим завданням сучасного суспільства є як скорочення обсягів утворення відходів, так і використання вже накопичених, зокрема, для отримання корисних нетоксичних продуктів різного призначення.

В Україні склалася критична ситуація з утворенням, накопиченням, зберіганням, переробленням, утилізацією та захороненням відходів, яка характеризується подальшим розвитком екологічних загроз. Забруднення навколишнього середовища твердими промисловими відходами та стічними водами складає значне навантаження на довкілля. Для вирішення питання утилізації відходів в Україні в 2017 році розроблена Національна стратегія з управління відходами, що передбачає план до 2030 року. Необхідно вирішити питання утилізації відходів та гармонізувати політику поводження з відходами з європейськими вимогами [1].

Науково-практичним завданням сьогодення є зменшення техногенного навантаження, пов'язаного з накопиченням, поводженням та мінімізацією відходів. Відповідно до принципів «зеленої хімії» [2], відходи виробництва або вторинна промислова сировина повинні підлягати хімічній переробці, а не спалюванню та зберіганню на спеціальних полігонах.

Відпрацьовані сорбенти, що утворюються в результаті очищення продуктів харчової та інших галузей промисловості, найчастіше складають у спеціальних сховищах, або зберігають на звалищах. Проблема

накопичення відпрацьованих сорбентів може бути частково вирішена шляхом відновлення їх сорбційних властивостей для повторного використання в технологічних процесах очищення, наприклад стічних вод.

Для вирішення цієї проблеми виникає необхідність вивчення умов повторного використання сорбентів для очищення промислових стічних вод, наприклад, гальванічного виробництва від іонів купрум(II) та сульфідно-лужних розчинів нафтохімічних виробництв від сульфід-іонів.

Метою роботи є дослідження доцільності і ефективності повторного використання відпрацьованого сорбенту харчової промисловості на основі активованого вугілля та кізельгуру для очищення стічних вод окремих промислових виробництв та можливості часткового вирішення проблеми накопичення відходів сорбентів.

### **Матеріали і методи**

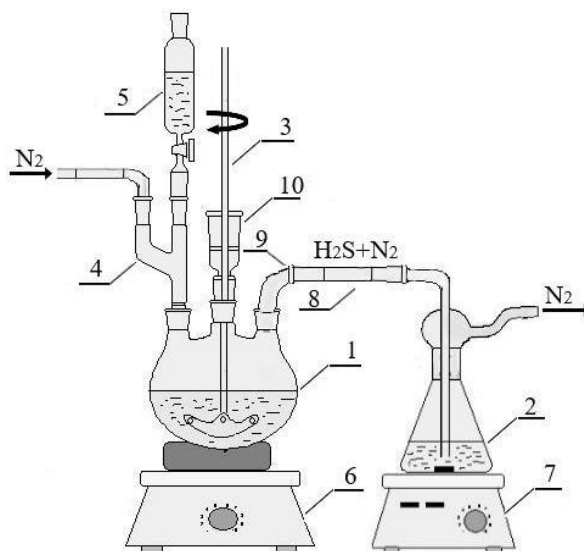
*Використані реактиви:* натрію сульфід нонагідрат ( $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , х.ч., Україна), купруму(II) сульфат пентагідрат ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , х.ч, Україна.), йод ( $\text{I}_2$ , х.ч., Чилі), калій йодид ( KJ, х.ч, Індія), натрію тіосульфат пентагідрат ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , х.ч., Україна), натрію етилендіамінтетраацетат дигідрат ( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , х.ч., Чехія), Мурексид ( $\text{C}_8\text{H}_8\text{N}_6\text{O}_6$ , х.ч., Україна), крохмаль ( $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ , х.ч., Україна), амоній гідроксид ( $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , х.ч., Україна), амоній хлорид ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ , х.ч., Україна), натрій гідроксид ( $\text{NaOH}$ , х.ч., Україна), хлоридна кислота (  $\text{HCl}$ , 36-38%, Україна). Реактиви були придбані у ТОВ «Сфера Сім» (м. Львів, Україна).

Як відпрацьований сорбент було використано суміш активованого вугілля та кізельгуру після очистки цукрового сиропу, відібрану на підприємстві по виробництву безалкогольних газованих напоїв «Панда» (Вінниця, Україна).

Модельні розчини натрію сульфідіду та натрію гідросульфідіду за концентраціями сульфід- та гідросульфід-іонів 1,40 та 0,21 моль/дм<sup>3</sup> відповідно з рН=12,6-13,2 були наближені до сульфідно-лужних розчинів нафтохімічних виробництв.

Модельні розчини купруму(II) сульфату за концентраціями  $\text{Cu}^{2+}$ -іонів в діапазоні 10-300 г/дм<sup>3</sup> з рН=1,5-2,5 були наближені до промивних вод процесу електрохімічного міднення.

*Прилади:* лабораторна установка (рис. 1), що складається із реактора, обладнаного механічною мішалкою з електроприводом, крапельною лійкою для додавання модельних розчинів, дворогого форштоса, трубок для введення та відведення інертного газу  $\text{N}_2$  та електронагрівального елемента. Друга частина універсальної установки складається із склянки Дрекселя і високошвидкісної магнітної мішалки. Склянка Дрекселя може бути використана для поглинання гідрогенсульфідіду, що виділяється із реактора, водним розчином купрум(II) сульфату із заданою концентрацією або розчином натрію гідроксиду.



**Рис. 1.** Лабораторна установка для дослідження адсорбційного очищення модельних розчинів:

1 – реактор; 2 – склянка Дрекслея; 3 – механічна мішалка з електроприводом; 4 – дворогий форштос; 5 – крапельна лійка; 6 – електронагрівальний елемент; 7 – магнітна мішалка; 8 – з’єднувальна трубка; 9 – перехідник; 10 – муфта (гідрозатвор)

Зважування речовин проводилось на аналітичних вагах AS 220.R2 (RADWWAG, Польща). Для перемішування використовували високошвидкісну магнітну мішалку VELP AREC (VELP Scientifica, Італія).

*Методи:* залишкову концентрацію сульфід- та гідросульфід-іонів у фільтраті визначали методом йодометричного титрування; залишкову концентрацію іонів купруму(II) у фільтраті після очищення води визначали методом комплексометричного титрування; модифіковану поверхню сорбентів досліджено методом дифузного відбиття на ІЧ-фур'є-спектрометрі Nicolet iN 10FX від Thermo Fisher Scientific у діапазоні  $4000\text{--}525\text{ см}^{-1}$  з максимальною роздільною здатністю  $4\text{ см}^{-1}$ ; дослідження поверхні зразків сорбентів методом рентгенофазового аналізу було проведено на дифрактометрі Дрон-3.

*Методика регенерації відпрацьованого сорбенту.* Регенерацію сорбенту проведено за методикою, описаною в роботах [3, 4]. Спочатку сорбент промивали водою, а потім додавали послідовно 1% NaOH та 4% HCl. Раціональні параметри регенерації: масове співвідношення сорбент :  $\text{H}_2\text{O} = 1:4$ ; час регенерації 45–60 хв; температура процесу  $50\text{--}60^\circ\text{C}$ ; інтенсивність перемішування реакційної маси 200 об/хв. Після фільтрування, промивання водою та сушіння при  $105^\circ\text{C}$  отримували регенований сорбент (РС).

*Методика вилучення іонів купруму(II) з модельних розчинів.* Вилучення іонів купруму(II) з модельних розчинів проведено відповідно до методики, описаної в роботі [5]. До 10 г регенованого сорбенту (РС) додавали  $100\text{ см}^3$  модельного розчину купрум(II)-іонів. Одержану суміш інтенсивно перемішували (350 об/хв) впродовж 30–45 хвилин за температури  $20\text{--}25^\circ\text{C}$  та залишали її для остаточного закінчення процесу

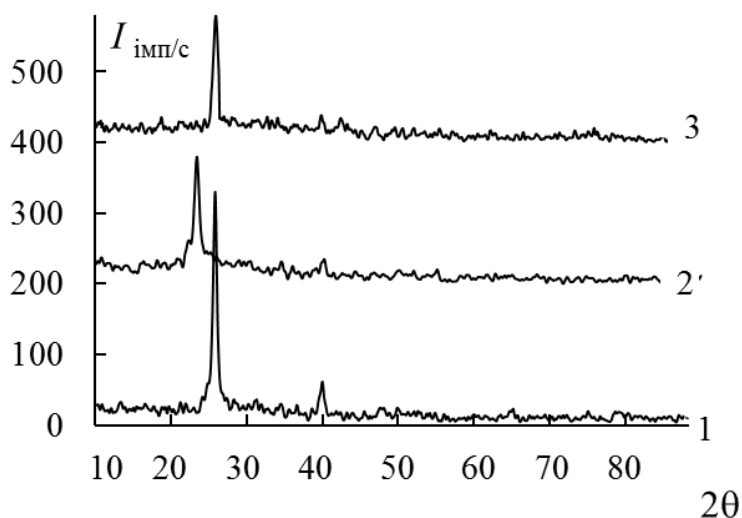
на одну добу за тієї ж температури. Суміш фільтрували під вакуумом і визначали у фільтраті залишкову концентрацію іонів  $\text{Cu}^{2+}$ . На основі одержаних експериментальних даних розраховували ступінь вилучення  $E$  (%) купрум(II)-іонів з розчину і адсорбційну ємність сорбенту  $\Gamma$  (мг/г).

*Методика вилучення сульфід- і гідросульфід-іонів з модельних розчинів (отримання модифікованого сорбенту - МС).* Вилучення сульфід- і гідросульфід-іонів з водних розчинів проведено відповідно до методики, описаної в роботі [6]. До 10 г РС через крапельну лійку додавали окремими порціями ( $\sim 30 \text{ см}^3$ ) модельний сульфідно-лужний розчин. Реакційну масу перемішували швидкісною мішалкою протягом 5–15 хв за температури 20–25 °С. Потім відбирали пробу і проводили якісний аналіз реакційної маси на наявність в ній сульфід- і гідросульфід-іонів. Потім додавали чергову порцію сульфідно-лужного розчину. Повне сорбування сульфід- і гідросульфід-іонів поверхнею сорбенту вважали завершеним за наявності в розчині сульфід- і гідросульфід-іонів. Осад  $[(\text{сорбент}) + \text{S}^{2-}, \text{HS}^-]$  (модифікований сорбент – МС) відфільтровували на фільтрі Шотта і висушували. Визначали ступінь вилучення сульфід-і гідросульфід-іонів.

*Методика вилучення іонів купруму(II) на модифікованому сорбенті (МС).* Вилучення купрум(II)-іонів з водних розчинів на модифікованому сорбенті проведено відповідно до методики, описаної в роботі [7]. В реактор поміщали 10 г модифікованого сульфід- та гідросульфід-іонами сорбенту. Потім із крапельної воронки додавали першу порцію ( $\sim 30 \text{ см}^3$ ) модельного розчину з вмістом купрум(II)-іонів  $150,0 \text{ мг/дм}^3$ . Реакційну масу перемішували швидкісною мішалкою протягом 5–15 хв за температури 20–25 °С. Після цього відбирали пробу і проводили якісний аналіз реакційної маси на наявність в ній не зв'язаних іонів купруму(II). Потім додавали чергову порцію розчину з аналогічною послідовністю проведення операцій. Розраховували ступінь вилучення  $E$  (%) купрум(II)-іонів з розчину.

### **Результати та обговорення**

Для дослідження ефективності регенерації відпрацьованого сорбенту визначали його сорбційну ємність за йодом. Використаний метод регенерації відпрацьованого сорбенту дозволяє на 100% відновити його сорбційну ємність з виходом 98%. Відновлення сорбційної ємності після регенерації пояснюється проходженням кислотно-основних хімічних реакцій на поверхні сорбенту та вимиванням продуктів їх взаємодії водою. Дані рентгенофазового аналізу (рис. 2) [3] підтверджують аморфний стан активованого вугілля, а також наявність у лівій частині дифрактограм кізельгуру основного піка кристоболіту  $\text{SiO}_2$ , що розміщується при 26 ° та характеризує вихідний сорбент (дифрактограма 1) та регенований сорбент (дифрактограма 3).



**Рис. 2.** Рентгенівські дифрактограми:

1 – вихідний сорбент; 2 – нерегенований сорбент, промитий водою; 3 – регенований сорбент (РС). Дифрактограми 2, 3 зміщені по осі Y на 100 імп/с

Однак, на дифрактограмі 2 нерегенованого сорбенту цей пік зсувається до більш низьких значень дифракційних кутів: від  $26^\circ$  до  $23^\circ$ . Таким чином, положення цього основного піка кристалоїту  $\text{SiO}_2$  в розглянутих дифрактограмах можна вважати надійним маркером, що вказує на ефективність регенерації відпрацьованого сорбенту.

Для дослідження ефективності повторного використання регенованого сорбенту для очищення стічних вод від хімічних забруднювачів, було проведено адсорбційне очищення модельних розчинів, які містили купрум(II)-, сульфід- і гідросульфід-іони.

Адсорбційне вилучення іонів купруму(II) з модельних розчинів в розглянутому діапазоні концентрацій показало низьку ефективність (табл. 1). Відновлений сорбент має низьку здатність адсорбувати іони купруму(II) з розчинів через зміни у складі поверхневих груп після кислотно-лужної активації. Отримані дані свідчать про незначну адсорбцію  $\text{Cu}^{2+}$  на сорбенті РС, що пояснюється як природою адсорбату, так і морфологією адсорбенту після його кислотно-лужної активації. Очевидно, що досліджуваний нами сорбент РС проявляє катіонообмінні властивості. Ступінь спорідненості іонів  $\text{Cu}^{2+}$  до цього сорбенту високий, але функціональних груп, що забезпечують цю спорідненість, мало. В області низьких значень рН ступінь сорбції невеликий, оскільки карбоксильні та фенольні групи сорбенту протоновані, при досить низьких концентраціях купруму(II) іони гідрогену конкурують за вільні сорбційні центри. Отже, без додаткового активування (модифікації) матричної поверхні регенованого сорбенту використання даного методу не доцільне.

Досліджено сорбційне очищення сульфідно-лужних розчинів від сульфід- та гідросульфід-іонів з використанням РС. Отримані результати подано в табл. 2. Аналіз даних підтверджує ефективне використання дослідженого РС. Так, ступінь вилучення сульфід- та гідросульфід-іонів

досягає 94-96 %, що вказує на високу ефективність процесу та на можливість його практичного використання.

**Таблиця 1.** Адсорбція купрум(II)-іонів на регенованому сорбенті (РС)

| Концентрація $\text{Cu}^{2+}$ , мг/дм <sup>3</sup> |                         | Ступінь<br>вилучення<br>$E$ , % | Адсорбційна<br>ємність<br>$\Gamma$ , мг/г |
|----------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| Початкова<br>( $C_0$ )                             | Рівноважна<br>( $C_p$ ) |                                 |                                           |
| 10                                                 | 9,40                    | 5,7                             | 0,057                                     |
| 30                                                 | 26,90                   | 10,4                            | 0,312                                     |
| 50                                                 | 44,20                   | 11,6                            | 0,58                                      |
| 150                                                | 115,05                  | 23,3                            | 3,50                                      |
| 300                                                | 209,8                   | 31,3                            | 9,39                                      |

**Таблиця 2.** Результати очищення сульфід- та гідросульфідвмісних модельних розчинів адсорбцією на регенованому сорбенті (РС)

| Маса сорбенту, г | Вихідна концентрація в розчині до очищення |                                    |                                       | Концентрація в розчині після очищення                  |            |                                                       |                           |
|------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------------|---------------------------|
|                  | $[S^{2-}]_0$<br>моль/дм <sup>3</sup>       | $[HS^-]_0$<br>моль/дм <sup>3</sup> | $[S_{заг}]_0$<br>моль/дм <sup>3</sup> | залишкова концентрація в розчині, моль/дм <sup>3</sup> |            | $[S_{заг}]_0 - [S_{заг}]_3$ ,<br>моль/дм <sup>3</sup> | ступінь вилучення $E$ , % |
|                  |                                            |                                    |                                       | $[S^{2-}]_3$                                           | $[HS^-]_3$ |                                                       |                           |
|                  |                                            |                                    |                                       |                                                        |            |                                                       |                           |
| 1                | 1,40                                       | 0,21                               | 1,61                                  | 0,79                                                   | 0,16       | 0,66                                                  | 41,0                      |
| 5                | 1,40                                       | 0,21                               | 1,61                                  | 0,53                                                   | 0,14       | 0,94                                                  | 58,4                      |
| 10               | 1,40                                       | 0,21                               | 1,61                                  | 0,24                                                   | 0,10       | 1,27                                                  | 78,9                      |
| 15               | 1,40                                       | 0,21                               | 1,61                                  | 0,17                                                   | 0,09       | 1,35                                                  | 83,9                      |
| 20               | 1,40                                       | 0,21                               | 1,61                                  | 0,12                                                   | 0,05       | 1,44                                                  | 89,1                      |
| 25               | 1,40                                       | 0,21                               | 1,61                                  | 0,06                                                   | 0,03       | 1,52                                                  | 94,4                      |
| 30               | 1,40                                       | 0,21                               | 1,61                                  | 0,05                                                   | 0,02       | 1,54                                                  | 95,7                      |

Рентгеноструктурний аналіз підтверджує наявність на поверхні регенованого сорбенту піків, характерних для  $\text{Na}_2\text{S}$  (рис. 3)[8].

Хімія поверхні має суттєвий вплив на властивості сорбентів і визначає їх поведінку у різноманітних фізико-хімічних процесах. Присутність навіть незначної кількості тих або інших поверхневих груп або атомів може суттєвим чином впливати на характеристики сорбенту та докорінно змінювати параметри процесів за їх участю. Модифікація також розширяє спектр сполук, що можуть бути іммобілізовані на поверхні сорбенту. На поверхні сорбенту утворюються різні функціональні групи, які сприяють утворенню міцних зв'язків із забруднювачами різних типів за рахунок сил хімічної взаємодії.

Для підвищення ефективності видалення іонів купруму(II) з модельних розчинів використали модифікований сорбент (МС) - [(сорбент) +  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{HS}^-$ ]. Ступінь адсорбції сульфідних та гідросульфідних іонів на поверхні регенованого сорбенту на стадії модифікації становив 95,7%, адсорбційна ємність сорбенту становила 163,2 мг/г.

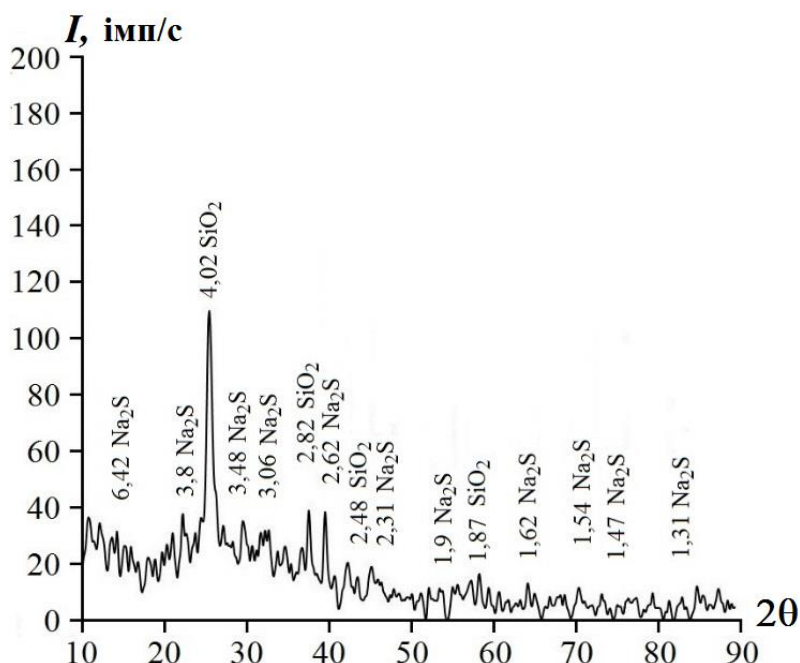


Рис. 3. Рентгенівська дифрактограма сполуки  $\text{Na}_2\text{S}$  на поверхні регенованого сорбенту (РС)

Як показали результати досліджень, модифікація поверхні більш активними сульфід- та гідросульфід-іонами призводить до значного підвищення її адсорбції відносно іонів купруму(II). Адсорбція починається з утворення сорбційного комплексу між сорбатом ( $\text{Cu}^{2+}$ ) і первинно активованим центром сорбенту. Модифікована поверхня сорбенту містить велику кількість сульфідних лігандів, які і забезпечують швидку адсорбцію іонів  $\text{Cu}^{2+}$ . Враховано можливу каталітичну дію активованого вугілля на проходження топохімічних перетворень на поверхні сорбенту. Фізико-хімічна модифікація поверхні матриці відбувається через утворення координаційного центру  $\text{CuS}_2(\text{HS})_2(\text{H}_2\text{O})_2$  (схема 1.). При цьому на поверхні сорбенту будуть утворюватися купруму(II) сульфід та елементарна сірка. Модифікація поверхні РС сульфурвмісними іонами ( $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{HS}^-$ ) дозволила збільшити ступінь вилучення катіонів купруму(II) у 65,5 рази.

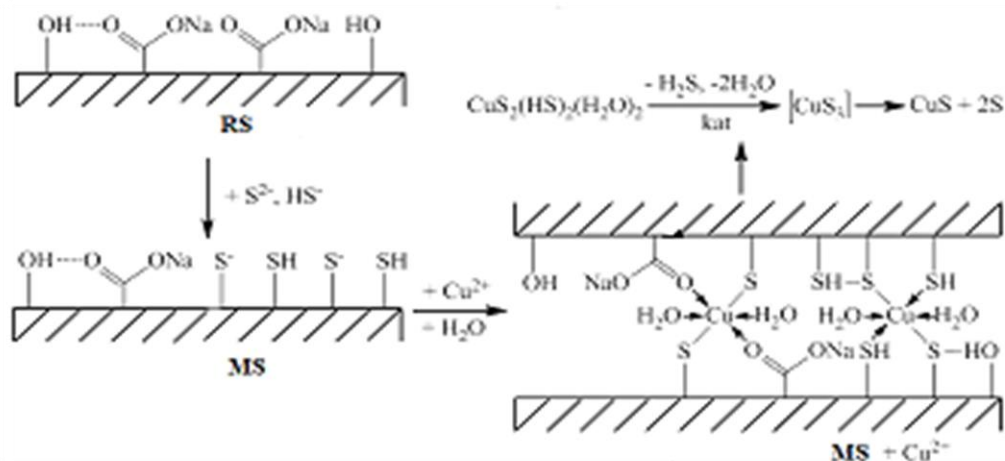
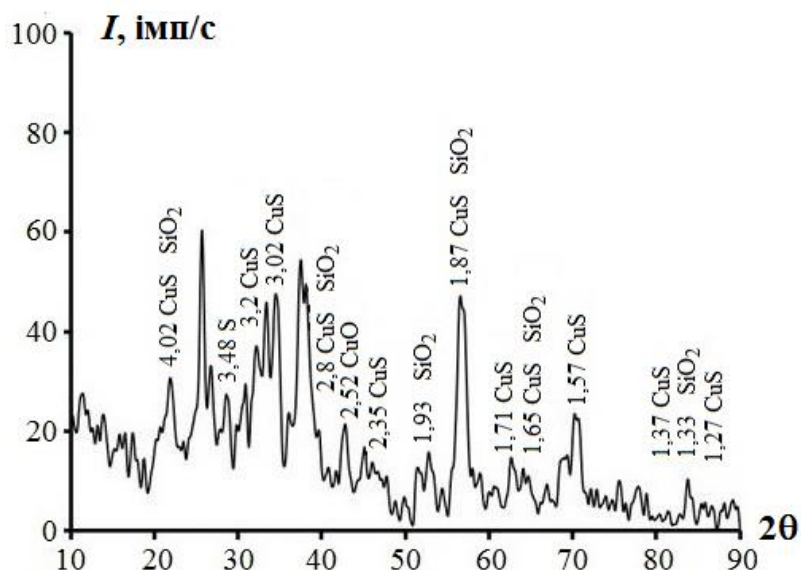


Схема 1. Фізико-хімічна модифікація поверхні РС та адсорбція іонів  $\text{Cu}^{2+}$  на МС

Рентгенівські дослідження підтверджують наявність купруму(II) сульфідів та елементарної сірки на поверхні модифікованого сорбенту після видалення іонів купруму(II) з розчину [5] (рис. 4) та підтверджують проходження топохімічних перетворень.



**Рис. 4.** Рентгенівська дифрактограма сполук CuS і S на поверхні регенованого сорбенту

Можливість проходження топохімічних перетворень була встановлена також за допомогою ІЧ-спектральних досліджень. У досліджуваних зразках спостерігалися характерні валентні коливання органічних функціональних груп:  $-\text{OH}$ ,  $-\text{C}(=\text{O})\text{O}-$  та валентні коливання хімічних зв'язків  $\text{Si}-\text{O}$ ,  $\text{C}-\text{S}$ ,  $\text{Cu}-\text{S}$  (табл. 3).

**Таблиця 3.** Характеристичні коливання функціональних груп ІЧ-Фур'є спектрів дифузного відбиття

| Об'єкт дослідження         | Коливання функціональних груп в ІЧ-Фур'є спектрах, $\text{cm}^{-1}$ |                                     |                    |                   |                    |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
|                            | $\nu(\text{-OH})$                                                   | $\nu(\text{-C}(=\text{O})\text{O})$ | $\nu(\text{Si-O})$ | $\nu(\text{C-S})$ | $\nu(\text{Cu-S})$ |
| Регенований сорбент (РС)   | 3410, 3196                                                          | 1510                                | 1045               | —                 | —                  |
| Модифікований сорбент (МС) | 3390                                                                | 1550                                | 1045               | 744               | —                  |
| РС + CuS + S               | 3110                                                                | 1550                                | 1045               | 770               | 590                |

Отриманий продукт водоочищення - сорбент із сорбованими на його поверхні сіркою та купрум(II) сульфідом може бути використаний як компонент пластичних мастил спеціального призначення [9-11].

**Висновки.** Проблема накопичення відпрацьованих сорбентів частково вирішується шляхом відновлення їх сорбційних властивостей через регенерацію. Адсорбційне очищення із застосуванням

регенерованого сорбенту харчової промисловості є найефективнішим розв'язанням проблеми запобігання забрудненню водоймищ стоком, що містить сульфід- і гідросульфід-іони. Ефективність сорбентів може бути суттєво збільшена фізичними або хімічними методами активування або модифікування поверхні. Отримані результати дозволяють рекомендувати модифікацію вуглецевих сорбційних матеріалів сульфурвмісними іонами ( $S^{2-}$ ,  $HS^-$ ) для більш повного сорбційного вилучення  $Cu^{2+}$ - іонів із стічних вод. Очищені таким методом стічні води можуть бути повторно використані в системах технічного водопостачання промислових підприємств [12]. Таке рішення є економічно і екологічно вигіднішим, оскільки скорочується споживання природної води, а також потрібно менш глибоке її очищення порівняно з варіантом скидання у водоймище. Результати дослідження також можуть бути використані в комплексному очищенні стічних вод від іонів  $Cu^{2+}$ ,  $S^{2-}$ ,  $HS^-$  методом сорбції. Важливо не тільки очищати воду та використовувати її повторно в замкнених виробничих циклах, а й не створювати додаткові тверді відходи у вигляді відпрацьованого сорбенту. Твердий продукт водоочищення може бути використаний для одержання цінних складових, наприклад, компонентів мастил спеціального призначення.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Власенко І.В., Постова В.В. Аналіз сучасних інноваційних методів утилізації відходів. *Економіка і організація управління*. 2020. № 3 (39). С. 30–40.
2. Warner J., Cannon A., Dye K. Green Chemistry. *Environmental Impact Assessment Review*. 2004. P. 775–799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.06.006>
3. Худоярова О.С. Комплексне сорбційне очищення промислових стічних вод від сульфід- та купрум(II)-іонів: дис.... к.т.н.: 05.17.21. Вінниця, ВДПУ. 2021. 170 с.
4. 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.
5. 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). P. 95–99. DOI: <https://doi.org/10.19261/cjm.2025.1250>
6. Худоярова О.С., Гордієнко О. А., Блашко А. В., Панченко Т. І., Ранський А. П. Десульфуризація промислових водно-лужних розчинів та отримання нових пластичних мастил. *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг: матеріали 3-ї міжнародної науково-практичної конференції*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. С. 318–319.
7. 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.
8. 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). P. 100–106. DOI: <http://dx.doi.org/10.17807/orbital.v17i1.22002>

9. Ранський А.П., Гордієнко О.А., Худоярова О.С., Крикливий Р.Д. Композиційні матеріали та консистентні мастила з підвищеними трибологічними властивостями. *Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: матеріали VI-ої Міжнародної конференції*, 13-15 вересня 2018 р., Вінниця, Україна. Ч. 1. ВНТУ, Вінниця, 2018. С. 61–62.
10. Khudoyarova Olga, Gordienko Olga, Blazhko Alina, Sydoruk Tetiana, Ranskiy Anatoliy. Desulfurization of industrial water-alkaline solutions and receiving new plastic oils. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. 6. P. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/123254>
11. 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. P. 51–58. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-8hu326>
12. Khudoyarova O.S., Ranskiy A.P., Gordienko O.A. Technology of complex sorption treatment of industrial wastewater from sulphide and Copper (II)-iones. *Water and water purification technologies. Scientific and Technical News*. 2021. 30 (2). P. 18-26. DOI: <https://doi.org/10.20535/2218-930022021237814>