



Journal of Chemistry and Technologies

pISSN 2663-2934 (Print), ISSN 2663-2942 (Online).

journal homepage: <http://chemistry.dnu.dp.ua>
editorial e-mail: chem.dnu@gmail.com



UDC 544.723.5:542.81:546.562

SORPTION OF METAL IONS BY CARBON SORBENTS OBTAINED FROM WASTE

Elina B. Khobotova, Vita V. Datsenko*

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslav Mudry Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

Received 6 February 2025; accepted 27 May 2025; available online 20 October 2025

Abstract

Industrial waste in many cases can be considered as secondary raw materials for the production of sorbents. The purpose of the work was to substantiate the possibility of using oxidized carbon sorbents to purify contaminated waters from Cu(II), Fe(II), Co(II), Ni(II) and Mn(II) compounds. The work used two variants of activated carbon (AC), made from agricultural plant waste with different ratios of sunflower husks and straw. Activation of carbon was carried out with water vapor at 800 °C, and oxidation with an 8 M HNO₃ solution at 70 °C for 5 hours. The indicators of the process of extracting of metal ions by different types of AC were determined. The adsorption value of AC decreases in the series of ions Fe>Cu>Ni>Co>Mn. When using oxidized AC, the adsorption value of Cu(II) ions is greater than Fe(II). Among the cations, the adsorption values of Cu(II) and Fe(II) ions are the closest, regardless of the degree of oxidation of coal. It has been shown that an increase in the surface concentration of functional groups contributes to more efficient adsorption of oxidized activated carbon samples. There is a relationship between the composition of raw materials and its sorption properties. It was determined that increasing the acidity of the solution and increasing the concentration of metal ions reduces the adsorption efficiency. The presence of other metal ions also reduces the degree of purification of solutions from Cu(II) ions. The determining stage in the sorption mechanism of Cu(II) is complexation with oxygen-containing functional groups: carboxyl and phenolic, which shows the complex nature of sorption with a significant proportion of chemisorption. The identity of the sorption mechanisms of Cu(II) and Fe(II) ions was , which allows these ions to be sorbed together. The results are aimed at increasing the efficiency and completeness of the water purification process.

Key words: wastewater; water purification; metal ions; sorption; activated carbon; surface functional groups

СОРБЦІЯ ІОНІВ МЕТАЛІВ ВУГЛЕЦЕВИМИ СОРБЕНТАМИ, ЩО ОТРИМАНІ З ВІДХОДІВ

Еліна Б. Хоботова, Віта В. Даценко

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, Харків, 61002, Україна

Анотація

Серед технологічних процесів очистки стічних вод велике значення має адсорбційний метод. Промислові відходи в багатьох випадках можуть розглядатися як вторинні сировинні ресурси для виробництва сорбентів. Перспективним напрямком є отримання сорбентів з відходів виробництва. Мета роботи – в обґрунтуванні можливості застосування окиснених вуглецевих сорбентів для очищення забруднених вод від сполук Cu(II), Fe(II), Co(II), Ni(II) і Mn(II). В роботі використовували два варіанти активованого вугілля (АВ), виготовлених з сільськогосподарських рослинних відходів із різним відношенням лушпиння соняшнику і соломи. Активацію вугілля здійснювали водяним паром за 800 °C, а окиснення – 8 М розчином HNO₃ за 70 °C протягом 5 год. Визначені показники процесу вилучення іонів металів різними типами АВ. Величина адсорбції АВ знижується в ряді іонів Fe>Cu>Ni>Co>Mn. За використання окисненого АВ величина адсорбції Cu(II) іонів більше за Fe(II). З ряду катіонів найближчими є значення величин адсорбції іонів Cu(II) і Fe(II) незалежно від ступеня окиснення вугілля. Показано, що збільшення поверхневої концентрації функціональних груп сприяє ефективності адсорбції окисненими зразками активованого вугілля. Існує залежність між складом вихідної сировини під час отримання АВ та його сорбційними властивостями. Визначено, що підвищення кислотності розчину й збільшення концентрації іонів металів знижує ефективність адсорбції. Присутність інших іонів металів зменшує ступінь очищення розчинів від Cu(II) іонів. Визначальною стадією в механізмі сорбції Cu(II) є комплексоутворення з оксигеновмісними поверхневими функціональними групами: карбоксильними і фенольними, що показує комплексний характер сорбції зі значною часткою хемосорбції. Показана ідентичність механізмів сорбції іонів Cu(II) і Fe(II), що дає можливість сорбувати ці іони сумісно. Результати спрямовані на підвищення ефективності та повноти процесу очистки вод.

Ключові слова: стічні води; очистка вод; іони металів; сорбція; активоване вугілля; поверхневі функціональні групи.

*Corresponding author: e-mail: dacenvita14@gmail.com

© 2025 Oles Honchar Dnipro National University;

doi: 10.15421/jchemtech.v33i3.322419

Вступ

Скидання великих кількостей відпрацьованих стічних вод у водойми зумовлює їх забруднення. На сучасному етапі залишаються актуальними питання підвищення ефективності заходів щодо охорони природи, раціоналізація використання водних ресурсів, впровадження замкнених циклів водоспоживання. Серед технологічних процесів очистки стічних вод велике значення має адсорбційний метод. Промислові відходи, що накопичуються в величезних кількостях, у багатьох випадках можуть розглядатися як вторинні сировинні ресурси для виробництва корисних матеріалів, у тому числі й сорбентів. Сорбційну активність можуть виявляти доменні шлаки [1], осад $\text{Fe}(\text{OH})_3$ стадії коагуляційної очистки [2], різні види гальваношламів [3], у тому числі й термічно оброблених [4]. Показано [5–8], що мідно-цинкові ферити, отримані зі стічних вод гальванічного виробництва, мають сорбційні властивості по відношенню до органічних барвників та іонів металів.

Найбільшого поширення для адсорбції розчинених речовин набули вуглецеві матеріали. Сучасними технологічними методами можна отримати вуглецеві сорбенти з відходів. Якщо температура обробки висока, то їх поверхня окиснюється, і утворюється окиснене вугілля з селективними сорбційними властивостями по відношенню до окремих домішок, в тому числі іонів важких металів. Перспективним напрямком є отримання сорбентів з відходів виробництва шляхом їх соактивації з дешевим низькосортним природним вугіллям. Авторами [9] отримане активоване вугілля (AB) з відходів переробки бавовни в процесі карбонізації за 500–800 °C і подальшої активації за 800 °C струмом води. Досягнута висока пористість карбонізованих продуктів та утворення функціональних груп. [10]. Сорбційна ємність AB за кадмієм у двостадійному процесі 107.5 мг/г порівняно з одностадійним (32.8 мг/г). Показана [11] можливість детоксикації ґрунтів від залишків гербіцидів під час використання AB, отримане з рослинних відходів: соломи (16 видів), лушпиння кавових зерен, соняшника, рису. Визначені оптимальні умови для переробки просочених H_2SO_4 , H_3PO_4 та солями $\text{Fe}(\text{II})$ текстильних відходів у процесі карбонізації [12]. Для отриманих AB зафіксована здатність видалення бавника оранжевого метилового. Метод отримання лігноцелюлозного

біовугілля [13] полягає в піролізі біомаси за температур 350–1000 °C в середовищах з обмеженим вмістом кисню.

В ряді робіт показана ефективність адсорбції іонів металів різними видами AB. Авторами [14] встановлена кореляція між адсорбцією іонів металу на комерційних зразках AB і властивостями пор або поверхні AB. Великі кількості іонів у порядку $[\text{Pb}^{2+}] \gg [\text{Zn}^{2+}]$, $[\text{Ni}^{2+}]$ були адсорбовані на AB. Показано [15], що адсорбційна здатність до іонів $\text{Pb}(\text{II})$, $\text{Cu}(\text{II})$ та $\text{Cd}(\text{II})$ збільшується зі збільшенням температури, значення pH, часу контакту, дозування комерційного AB та концентрації іонів металів, проте знижується зі збільшенням розміру частинок адсорбенту. Найбільша швидкість видалення характерна для $\text{Pb}(\text{II})$. Окиснене AB ефективно сорбує іони $\text{Cd}(\text{II})$ та $\text{Zn}(\text{II})$ з подальшою регенерацією сорбенту за температури 1273 K [16]. Шляхом фізико-хімічної активації реагентами KOH та CO_2 AB, що отримане з ейхорнії (водяного гіацинту), досягнуті максимальні сорбційні ємності для іонів Pb^{2+} і Cd^{2+} , відповідно, мг/г: 102 і 49.5 [17]. Під час одержання AB з насіння пальми агуахе використовували хімічну активацію H_3PO_4 і окиснення 1 M HNO_3 для підвищення частки поверхневих оксигенвмісних груп (фенольних і карбоксильних) [18]. Обґрунтована [19] можливість отримання сульфурвмісного біовугілля шляхом одностадійного сопіролізу рисового лушпиння з сульфурвмісними реагентами за температури 350–400 °C. Поглинаюча здатність біовугілля до іонів $\text{Cd}(\text{II})$ та $\text{Cu}(\text{II})$ більше 90 % заснована на хемосорбції з утворенням нерозчинних CdS і CuS на поверхні та в порах сорбенту. Також показана [20] можливість отримання екосорбенту з рослинних відходів виробництва цукрової тростини піролізом сировини спільно з сульфурвмісними реагентами. Подальша мікробіологічна модифікація за участю іммобілізації сульфатвідновлюючих бактерій на поверхні біовугілля сприяє перетворенню сорбованих важких металів ($\text{Cd}(\text{II})$, $\text{Cu}(\text{II})$, $\text{Pb}(\text{II})$ та $\text{Zn}(\text{II})$) в нерозчинні сульфідні форми.

Спостерігалось зростання адсорбції іонів металів $\text{Cr}(\text{III})$, $\text{Cd}(\text{II})$ і $\text{Pb}(\text{II})$. Порядок адсорбції на неокиснених і окиснених активованих вугіллях був $\text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cr}$. Встановлено [21], що низькотемпературна карбонізація і наступна високотемпературна соактивація суміші відходів дозволяє отримати активоване вугілля, адсорбційна ємність якого по

відношенню до Cr(III) і Cr(VI) значно перевищує величини, знайдені для комерційного активованого вугілля «Norit» і «Merck».

Мета роботи – обґрунтувати можливість застосування окиснених вуглецевих сорбентів для очищення забруднених вод від сполук Cu(II), Fe(II), Co(II), Ni(II) і Mn(II).

Експериментальна частина

Методика досліджень. У роботі використовували зразки АВ, виготовленого з сільськогосподарських рослинних відходів. Для

одержання вугілля використовували два варіанти складів відходів, що не дає підстав для однозначного висновку про роль природи відходів. Склад, умови активації і окиснення вказано в таблиці 1. АВ-1 і АВ-3 – вугілля, які відрізняються за вихідним складом, активовані водяним паром за температури 500 °С; АВ-2 – вугілля неактивоване, отримане з такої самої суміші, що і АВ-3. АВ-1ок і АВ-3ок – окиснені зразки вугілля АВ-1 і АВ-3 (додаткова обробка розчином HNO₃ концентрацією 8 М за 70 °С протягом 5 год).

Table 1

Composition, conditions of activation and oxidation of coal

Таблиця 1

Склад, умови активації і окиснення вугілля				
Вугілля	Склад, %		Активація	Окиснення
	лушпиння соняшнику	солома		
АВ-1	50	50	Водяна пара, 500 °С	–
АВ-1ок	50	50	Водяна пара, 500 °С	8 М HNO ₃ , 70 °С, 5 год
АВ-2	30	70	Неактивоване	
АВ-3	30	70	Водяна пара, 500 °С	–
АВ-3ок	30	70	Водяна пара, 500 °С	8 М HNO ₃ , 70 °С, 5 год

Природу поверхневих функціональних груп (ПФГ) визначали за допомогою ІЧ-спектроскопії. ІЧ-спектри одержували в таблетках KBr на Фур'є ІЧ-спектрофотометрі SPECTRUM ONE (Perkin Elmer) в інтервалі 450–

4000 см⁻¹ з роздільною здатністю за хвилювими числами 1 см⁻¹. Характеристики АВ представлені в таблиці 2. Відмічається збільшення числа ПФГ під час окиснення АВ.

Table 2

Surface functional groups of activated carbon

Таблиця 2

Поверхневі функціональні групи активованого вугілля				
Вугілля	S _{пит} , м ² /г	Карбоксильні, мг-екв/г		Фенольні, мг-екв/г
		гідратні	негідратні	
АВ-1	640.0	0.04	0.18	1.95
АВ-1ок	530.0	0.42	0.98	2.58
АВ-2	294.2	0	0.56	0
АВ-3	370.7	0	0.59	0
АВ-3ок	–	0.20	1.95	0.72

Питому поверхню порошків адсорбентів визначали хроматографічним методом адсорбції і подальшої теплової десорбції суміші газів: 20 % азоту і 80 % гелію.

Сорбційні властивості окисненого вугілля визначали по зменшенню концентрацій іонів металів у розчині. Концентрації іонів металів визначалися атомно-абсорбційним методом. За результатами вимірювань розраховували величину адсорбції А, мг/г і ступінь вилучення іонів η, %. Для визначення часу досягнення рівноваги адсорбції проведена серія вимірювань сорбції металів на АВ-1 і АВ-1ок із розчинів з концентрацією кожного з іонів у суміші 1–10 мг/л (V = 50 мл, m = 0.25 г, t = 25 °С). У цих розчинах допустимі концентрації токсичних металів перевищені, вони

моделюють стічні води в технологіях переробки металовмісної вторинної сировини. Максимальний час вилучення іонів металів досягав 72 год.

Результати та їх обговорення

За вмісту металів у розчинах 1 мг/л суміш іонів всіх металів була повністю вилучена на обох зразках активованого вугілля незалежно від рН розчинів вже за 1 годину контакту розчину з адсорбентом. Вміст іонів металів у фільтраті після сорбції – нижче чутливості атомно-абсорбційного метода. В багатокомпонентних розчинах концентрація кожного із присутніх іонів металів близька до 10 мг/л. Величина адсорбції іонів металів на АВ-1 знижується в ряду Fe > Cu > Ni > Co > Mn (табл. 3). Під час використання АВ-1ок складається

ідентичний ряд за винятком того, що величина адсорбції Купрум(II) іонів більша за $A_{\text{Fe(II)}}$. З ряду катіонів найближчі значення A під час сорбції іонів Fe(II) і Cu(II) незалежно від ступеня окиснення вугілля.

Для досягнення величини адсорбції Cu(II), близької до рівноважної, тобто значення A

94 % за 72 год, необхідно не менше 8 год на вихідному вугіллі і майже 1 год на його окисненому зразку (табл. 3). Для АВ-1ок за добу досягається практичне повне насичення адсорбенту.

Table 3

Extraction of metal ions from aqueous solutions

Таблиця 3

Вилучення іонів металів із водних розчинів							
Іони металів	$C_{\text{ме}}$, мг/л	1 год	4 год	8 год	24 год	48 год	72 год
		Величина адсорбції на АВ-1, мг/г					
Cu (II)	11.0	1.11	1.18	1.22	1.29	1.3	1.3
Mn (II)	9.4	0.17	0.20	0.27	0.32	0.39	0.39
Fe (II)	10.1	1.48	1.72	1.75	1.94	1.96	1.97
Co (II)	9.2	0.26	0.28	0.32	0.41	0.43	0.44
Ni (II)	9.9	0.30	0.33	0.37	0.42	0.47	0.58
Іони металів	$C_{\text{ме}}$, мг/л	Величина адсорбції на АВ-1ок, мг/г					
		1 год	4 год	8 год	24 год	48 год	72 год
Cu (II)	11.0	1.77	1.86	1.88	1.88	1.89	1.89
Mn (II)	9.4	0.24	0.32	0.37	0.37	0.36	0.31
Fe (II)	10.1	1.69	1.73	1.77	1.78	1.79	1.80
Co (II)	9.2	0.55	0.67	0.75	0.73	0.74	0.74
Ni (II)	9.9	0.69	0.78	0.95	1.21	1.19	1.20

Аналогічні результати спостерігаються під час адсорбції Fe(II), що припускає близькість механізмів сорбції цих іонів. В умовах експерименту ступінь вилучення Cu(II) і Fe(II) за 24 год сорбції складав 88.3 і 80.8 % для АВ-1 та 82.9 і 82.4 % для АВ-1ок. Таким чином, ймовірна аналогія механізмів адсорбції Cu(II) і Fe(II), яка визначається якістю і кількістю ПФГ.

Припускається, що механізм адсорбції на АВ включає іонний обмін, що не суперечить припущеному раніше механізму сорбції Cu(II) – іонний обмін з наступним комплексоутворенням [22]. Підтвердженням здійснення іонного обміну є результати

вивчення впливу кислотності середовища на сорбційне вилучення Cu(II) із багатокомпонентних розчинів ($t_{\text{сорб}} = 24_{\text{год}}$), що наведені в таблиці 4. Підкислення здійснювали хлоридною кислотою. Розчини містили також по 10 мг/л Fe(II), Co(II), Ni(II), Mn(II). Видно, що зі збільшенням кислотності розчинів величина адсорбції A і ступінь вилучення Купрум(II)-іонів n знижуються. Це може бути пов'язане з пригніченням дисоціації карбоксильних та фенольних груп у сильноокислому середовищі. Для окисненого вугілля АВ-1ок залежність показників адсорбції від кислотності середовища аналогічна, але A і n вище.

Table 4

Dependence of the adsorption of Cu(II) ions on the pH of solutions

Таблиця 4

Залежність адсорбції Cu(II) іонів від рН розчинів					
$C_{\text{Cu вих}}$, мг/л	рН	АВ-1		АВ-1ок	
		A , мг/г	n , %	A , мг/г	n , %
11.0	1.2	0.408	18	–	–
10.0	1.2	–	–	0.96	49
11.0	3.8	1.29	55	–	–
10.0	3.8	–	–	1.88	94

За умов $C_{\text{Cu вих}} = 8.6$ мг/л, рН 3.56–3.58, $t_{\text{сорб}} = 24$ год, максимальні величини адсорбції зразка АВ-1 за іонами Cu(II) складають 4.0 мг/г для однокомпонентних і 2.7 мг/г для багатокомпонентних розчинів. Величина адсорбції для АВ-3ок досягає 14.9 мг/г, що перевищує аналогічне значення A для АВ-1ок, яке дорівнює 5.2 мг/г, тобто сорбційні властивості окисненого вугілля залежать від складу

вихідної сировини. Порівняння цих результатів з даними таблиці 3 показує, що зниження концентрації Cu(II) іонів збільшує величину адсорбції.

За умови підвищення температури на 30° зниження величини адсорбції Cu(II) незначне, ≈ 2.8 % (умови: $C_{\text{Cu вих}} = 8.6$ мг/л, рН 3.56–3.58, $t_{\text{сорб}} = 6$ год). Це підтверджує комплексний характер процесу сорбції, який включає

іонний обмін і комплексоутворення. Внаслідок здійснення лише фізичної адсорбції зменшення A має бути більшим. Зміна A для іонів Cu(II) і Mn(II) зі зростанням температури проходить через незначний мінімум, що характерно і для температурних змін величини сорбції Cr(III) на тому самому активованому вугіллі [21].

Висновки

Порівняння показників процесу вилучення іонів металів різними типами АВ показало більшу ефективність адсорбції окисненими зразками АВ завдяки більшій поверхневій концентрації функціональних груп. Сорбційні властивості визначаються складом вихідної сировини під час отримання АВ.

Доведена залежність ефективності адсорбції від зовнішніх чинників. Підвищення

кислотності розчину і збільшення концентрації іонів металів знижує ефективність адсорбції. Присутність інших іонів металів зменшує ступінь очищення розчинів від Купрум(II)-іонів. Показана ідентичність механізмів сорбції іонів Cu(II) і Fe(II) , що дає можливість сумісно сорбувати ці іони.

Показано, що визначальною стадією в механізмі сорбції Купрум(II)-іонів є комплексоутворення з оксигеновмісними ПФГ: карбоксильними і фенольними. Це доводить комплексний характер процесу сорбції зі значною часткою хемосорбційної взаємодії.

У подальшому планується дослідження вилучення іонів Cu(II) з виробничих розчинів і промивних вод.

References

- [1] Khobotova, E. B., Kaliuzhna, Iu. S., Datsenko, V. V., Larin, V. I. (2022). Toxic and hydraulic activity of blast furnace slag as the main criteria for choosing the technology of their utilization. *J. of Chem. and Techn.*, 29(2), 312–320. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v29i2.228352>
- [2] Edwards, M., Benjamin, M. M. (1989). Regeneration and Reuse of Iron Hydroxide Adsorbents in Treatment of Metal-Bearing Wastes. *Water Pollution Control Federation*, 61(4), 481–490. <http://www.jstor.org/stable/25046963>
- [3] Orfanova, M. M., Orfanova, M. M., Pustogov, V. I. (2013). [Perspective Directions of Use of Galvanic Production Waste]. *Energy technologies and resource saving*, 4, 47–51. (in Ukrainian)
- [4] Larin, V., Datsenko, V., Egorova, L., Hraivoronskaia, I., Herasymchuk, T. (2020). Physical and chemical properties of copper-zinc galvanic sludge in the process of thermal treatment. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*, 9(1), 66–75. <https://doi.org/10.17721/fujcV8i1P66-75>
- [5] Datsenko, V. V., Khobotova, E. B., Belichenko, E. A., Vankevich, A. V. (2021). [Multifunctionality of a composite material based on copper-zinc ferrite]. *J. of Chem. And Techn.*, 29(4), 476–484. (in Russian) <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v29i4.240173>
- [6] Datsenko, V. V., Khobotova, E. B., Vankevich, O. V., Tolmachov, S. M. (2022). Technically useful properties of copper-zinc ferrites. *Functional Materials*, 29(1), 62–71. <https://doi.org/10.15407/fm29.01.62>
- [7] Datsenko, V. V., Khobotova, E. B., Kolodiaznyi, V. M., Lisin, D. O. (2022). [Effectiveness of cleaning solutions from organic dyes when using copper-zinc ferrites]. *J. of Chem. and Techn.*, 30(2), 184–191. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.250987>
- [8] Datsenko, V. V., Khobotova, E. B., Kolodiaznyi, V. M., Lisin, D. O. (2022). The use of ferrite composites for waste water purification from organic dyes. *Functional Materials*, 29(3), 462–467. <https://doi.org/10.15407/fm29.03.462>
- [9] Sartova, K., Omurzak, E., Kambarova, G., Dzhumayev, I., Borkoev, B., Abdullaeva, Zh. (2019). Activated carbon obtained from the cotton processing wastes. *Diamond and Related Materials*, 91, 90–97. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.11.011>
- [10] Zubrik, A., Matik, M., Hredzák, S., Lovás, M., Danková, Z., Kováčová, M., Briančin, Ja. (2017). Preparation of chemically activated carbon from waste biomass by single-stage and two-stage pyrolysis. *J. of Cleaner Production* 143, 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.061>
- [11] Mukhin, V., Bogdanovich, N. (2022). Activated carbons from vegetable waste. *J. Advanced Materials and Technologies*, 7(2), 135–148. <https://doi.org/10.17277/jamt.2022.02.pp.135-148>
- [12] Gumus, H., Buyukkidan, B. (2023). Effect of different chemicals on the carbonization behaviors and pollution removal performance of biochar adsorbents derived from textile waste. *Azerbaijani Chemical J.*, 1, 97–107. <https://doi.org/10.32737/0005-2531-2023-1-97-107>
- [13] Chemerys, V., Baltrenalte, E. (2018). A review of lignocellulosic biochar modification towards enhanced biochar selectivity and adsorption capacity of potentially toxic elements. *Ukrainian J. of Ecology*, 8, 21–32. https://doi.org/10.15421/2018_183
- [14] Kuroki, A., Hiroto, M., Urushihara, Y., Horikawa, T., Sotowa, K., Alcántara Avila, J. R. (2019). Adsorption mechanism of metal ions on activated carbon. *Adsorption*, 25, 1251–1258. <https://doi.org/10.1007/s10450-019-00069-7>
- [15] Li, J., Dong, X., Liu, X., Xu, X., Duan, W., Park, J., Gao, L., Lu, Y. (2022). Comparative Study on the Adsorption Characteristics of Heavy Metal Ions by Activated Carbon and Selected Natural Adsorbents. *Sustainability*, 14(23), 15579. <https://doi.org/10.3390/su142315579>
- [16] Sato, S., Yoshihara, K., Moriyama, K., Machida, M., Tatsumoto, H. (2007). Influence of activated carbon surface acidity on adsorption of heavy metal ions and aromatics from aqueous solution. *Applied Surface Science*, 253(20), 8554–8559. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.04.025>
- [17] Salman, S. D., Rasheed, I. M., Mohammed, A. K. (2021). Adsorption of heavy metal ions using activated carbon derived from Eichhornia (water hyacinth). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 779, 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/779/1/012074>
- [18] Paredes-Doig, A., Pinedo-Flores, A., Aylas-Orejón, J., Obregón-Valencia, D., Sun Kou, M. (2020). The

- interaction of metallic ions onto activated carbon surface using computational chemistry software. *Adsorption Science & Technology*, 38(5–6), 191–204. <https://doi.org/10.1177/0263617420919234>
- [19] Khokhlov, A. V., Khokhlova, L. I. (2022). Modified rice husk biochar for binding Cd(II), Cu(II) ions in aqueous solutions. *J. of Chem. and Techn.*, 30(4), 659–666. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i4.268174>
- [20] Khokhlov, A. V., Sych, N. V., Khokhlova, L. I. (2022). Using modified biochar from bagassa for removal heavy metal. *J. of Chem. And Techn.*, 30(3), 459–465. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.262094>
- [21] Lyubchik, S. I., Lyubchik, A. I., Galushko, O. L., Tikhonova, L. P., Vital, Jo., Fonseca, I. M., Lyubchik, S. B. (2004). Kinetics and thermodynamics of the Cr (III) adsorption on the activated carbon from co-mingled wastes. *Colloids and Sufaces A Physicochem. Eng. Aspects*, 242(1–3), 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.04.066>
- [22] Khobotova, E. B., Datsenko, V. V. (2023). [Sorption properties of oxidized and non-oxidized activated carbon with respect to copper(II) ions]. *Visnyk Nats. technical KhPI University. Ser.: Chemistry, chem. technology and ecology*, 9(1), 56–59. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2023.01.08>