

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-07>

УДК: 504.5:628.3

З. В. ЛАВРИНЮК¹, канд. хім. наук, доц.,

доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища

e-mail: lavrynyuk.zoryana@vnu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1906-3330>

О. А. КАРАЇМ¹, канд. екон. наук, доц.,

доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища

e-mail: olha.karaim@vnu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1722-4110>

В. Т. ДУБЕНСЬКА¹,

здобувачка другого рівня вищої освіти

e-mail: dubenska2003@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-0280-9029>

¹Волинський національний університет імені Лесі Українки,
просп. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., 43025, Україна

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ БІОВУГІЛЛЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД

Мета. Дослідження ефективності використання біовугілля як сорбенту для очищення стічних вод від органічних і неорганічних забруднювачів на процес адсорбції, а також оцінка екологічної доцільності та можливості повторного використання біовугілля у технологіях водоочищення.

Методи. Експериментальний, адсорбційної атомної спектроскопії на приладі *UNICAM Solaar 939*, статистичний.

Результати. Досліджено вплив початкової концентрації, рН середовища, дози сорбенту та часу контакту. Встановлено, що сильна адсорбція забруднювачів на біовугіллі у водних розчинах зменшує мобілізацію забруднюючих речовин і допомагає зменшити ризик, пов'язаний з токсичними хімікатами та їх побічними продуктами, що присутні у стічних водах та можуть негативно впливати на навколишнє середовище. Значення рН середовища значною мірою впливає на поверхневий заряд і специфікацію хімічних речовин у всіх сорбентах біовугілля. Високі концентрації забруднень ускладнюють повне видалення. Використання біовугілля видаляє забруднення найкраще в умовах низьких початкових концентрацій забруднень. Ефективність очищення підвищується з часом контакту, що пов'язано з тривалістю процесу між біовугіллем і забрудником. Але надмірне збільшення часу може призвести до насичення, що обмежить ефективність видалення забруднень. Підтверджено також екологічну безпеку використання біовугілля та його придатність до багаторазового застосування з мінімальною втратою сорбційних властивостей.

Висновки. Встановлено, що біовугілля є ефективним сорбентом для видалення забруднювачів із водних розчинів завдяки своїм фізико-хімічним властивостям: великій питомій поверхні, розвиненій пористості та наявності активних функціональних груп. Біовугілля є перспективним матеріалом для впровадження в системи очищення стічних вод у промисловості, сільському господарстві та побуті.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: забруднення води, адсорбція, біовугілля, очистка стічних вод, концентрація, рН.

Як цитувати: Лавринюк З. В., Караїм О. А., Дубенська В. Т. Екологічні аспекти використання біовугілля для очистки стічних вод. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2025. Вип. 32. С. 101–109. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-07>

Incites: Lavrynyuk, Z. V., Karaim, O. A., & Dubenska, V. T. (2025). Environmental principles of using biocharol for wastewater treatment. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (32), 101–109. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-07> (in Ukrainian)

Вступ

Забруднення стічних вод є серйозною екологічною проблемою, що загрожує водним ресурсам, екосистемам і здоров'ю населення. Традиційні методи очищення не завжди є ефективними, економічно вигідними чи екологічно безпечними. У цьому контексті використання біовугілля, як природного сорбенту, набуває особливої актуальності. Біовугілля, виготовлене з відновлюваних джерел біомаси, має високу здатність до адсорбції органічних та неорганічних забруднювачів, може бути регеноероване та повторно використане, що робить його перспективним матеріалом для сталих систем очищення води. Дослідження екологічних переваг та ефективності біовугілля у водоочищенні сприяє розвитку «зелених» технологій та впровадженню екологічно безпечних рішень у сфері водопідготовки [1 - 5].

Упродовж останніх років біовугілля привертає значну увагу науковців як перспективний, екологічно безпечний та економічно вигідний сорбент для очищення стічних вод. Сучасні дослідження зосереджуються на вдосконаленні властивостей біовугілля, його модифікації та інтеграції з іншими технологіями для підвищення ефективності видалення забруднювачів [2, 6]. Зокрема, автори [7] дослідили процеси видалення важких металів шляхом сорбції з використанням біовугілля. Автори [8] довели ефективність використання нанокompозитів на основі біовугілля для очищення навколишнього середовища. У працях [9 - 11] подано резуль-

тати дослідження механізмів та адсорбційних можливостей біовугілля для видалення органічних та неорганічних забруднювачів з промислових стічних вод. Дослідження, проведене авторами [12], показало, можливості модифікації поверхні біовугілля для ефективного видалення барвників зі стічних вод. Завдяки магнітним властивостям нове магнітне біовугілля ефективно сорбує органічні забруднювачі та фосфати, сорбент легко виділяється з очищеної води [13].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз сучасних робіт свідчить про наявність розвинутої теоретичної та практичної бази щодо застосування інноваційних методів очистки стічних вод [9 -11, 14 -17], використання ж біовугілля як сорбента для очистки є актуальним через його екологічність. Проте недостатньо досліджень, які б інтегрували біологічні, фізико-хімічні умови для локальних умов. Це обумовлює актуальність нашого дослідження, адаптованого до специфіки місцевих стічних вод.

Метою роботи є дослідження ефективності використання біовугілля як сорбенту для очищення стічних вод від органічних і неорганічних забруднювачів, з урахуванням впливу різних факторів (початкової концентрації, рН середовища, дози сорбенту та часу контакту) на процес адсорбції, а також оцінка екологічної доцільності та можливості повторного використання біовугілля у технологіях водоочищення.

Об'єкти та методи дослідження

У дослідженні використано експериментальний підхід для визначення ефективності біовугілля як сорбенту при очищенні водних розчинів від забруднювачів.

У якості барвника використано малахітовий зелений – триарилметановий барвник, хімічна формула – $C_{23}H_{25}ClN_2$. Це хімічна сполука з характерним зеленим кольором. Його можна використовувати для нейтралізації певних хімічних забруднювачів за допомогою процесів окислення або зв'язування, що призводить до зменшення їх токсичності або мобільності в навколишньому середовищі. Також малахітовий зелений часто застосовують для фарбування у текстильній промисловості.

У першому експерименті приготовано 5 проб з різною концентрацією барвника. До колб об'ємом 250 мл, у кожную з яких внесли по 0,1 г біовугілля, додавали по 20 мл водних розчинів барвника з концентрацією від 5 до 100 мг/дм³. Ці розчини готували шляхом розчинення 0,0251 г барвника у мірній колбі на 250 мл з дистильованою водою, після чого суміш ретельно перемішували. Із приготованого розчину автоматичною піпеткою відбирали 10 мкл і переносили в колби місткістю 100 мл. Зразки струшували протягом 120 хвилин, після чого фільтрували. Визначення залишкових концентрацій проводили методом адсорбційної атомної спектроскопії за допомогою приладу UNICAM Solaar 939.

У другому – підготовлено 5 розчинів з різним вмістом біовугілля: у п'ять колб об'ємом 100 мл додавали по 20 см³ модельного розчину та різні кількості біовуглецю (від 0,01 до 0,5 г). Зразки струшували протягом 120 хвилин, після чого фільтрували. Залишкову концентрацію барвника малахітового зеленого контролювали за допомогою спектроскопії.

У третьому – виготовлено 3 розчини з різними значеннями pH: 20 мл модельного водного розчину (pH в діапазоні 4–8) додавали в колби об'ємом 100 мл, що містили 0,1 г біовуглецю. Зразки струшували протягом 120 хв і фільтрували. Адсорбцію перевіряли методом спектроскопії.

У четвертому – відібрано 8 проб для оцінки впливу часу контакту біовугілля з розчином. У колби об'ємом 250 мл, що містили по 0,1 г біовуглецю, додавали по 200 мл модельного розчину з концентрацією 20 мг/дм³. Зразки струшували впродовж різного часу (від 0 до 120 хвилин), після чого фільтрували. Концентрацію забруднювача у фільтраті визначали методом адсорбційної атомної спектроскопії з використанням приладу UNICAM Solaar 939.

Усі зразки перемішували в шейкер-інкубаторі (рис. 1. а, б) (для підтримання рівномірного змішування середовища протягом інкубації) та аналізували на вміст барв



Рис. 1 – Шейкер-інкубатор 4800-10 contro (а); досліджувані зразки після перемішування у шейкер-інкубаторі (б)

Fig. 1 – 4800-10 Contro shaker-incubator (a); investigated samples after mixing in the shaker-incubator (b)

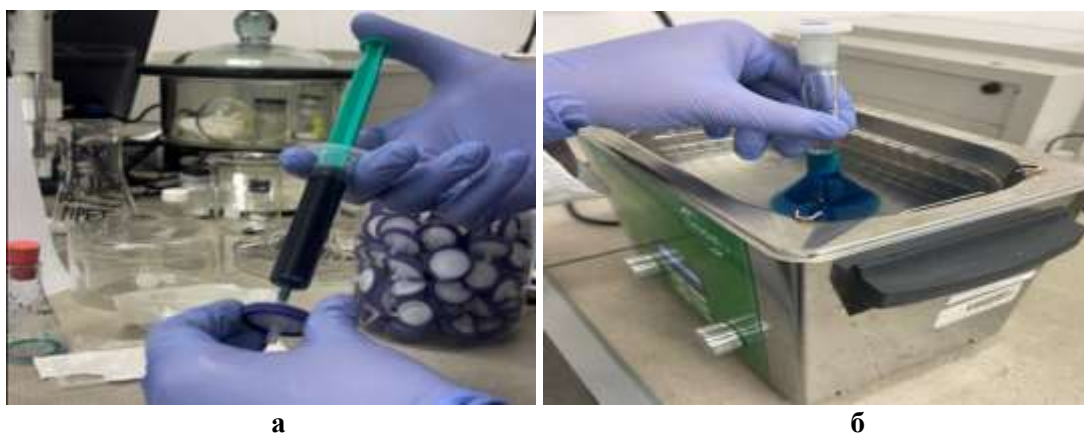


Рис. 2 – фільтрування розчинів через шприцевий фільтр (а); видалення бактеріального забруднення за допомогою ультразвуку (б)

Fig. 2 – filtration of solutions through a syringe filter (a); removal of bacterial contamination using ultrasound (b)

ника за допомогою спектрофотометра UNICAM Schar 237. Наважки біовугілля здійснювали на аналітичних вагах з точністю до четвертого знаку після коми. Фільтрування здійснювали через шприцевий фільтр (рис. 2, а, б).

Основні етапи дослідження включали: підготовку розчинів барвника малахітового зеленого з різною початковою концентрацією; застосування біовугілля у різних дозах (0,01–0,5 г) для дослідження впливу маси сорбенту на ефективність очищення; вивчення впливу рН середовища (діапазон 4–8) на процес адсорбції; оцінку впливу часу конта-

кту (0–120 хвилин) на інтенсивність видалення забруднювача; фільтрацію зразків після завершення кожного етапу експерименту; визначення залишкової концентрації забруднювачів за допомогою адсорбційної атомної спектроскопії на приладі UNICAM Solaar 939. Методика дозволила кількісно оцінити вплив кожного параметра на ефективність процесу очищення та провести аналіз отриманих результатів з метою виявлення оптимальних умов адсорбції. Отримані дані піддавали статистичній обробці з розрахунком середніх значень, побудовою графіків та кореляційним аналізом.

Результати та обговорення

Біовугілля – це багата на вуглець тверда речовина, яку отримували шляхом термічної обробки біомаси в середовищі з обмеженим вмістом кисню. Його можна змінити, щоб покращити структурні та електрохімічні властивості, додавши пористості, збільшивши площу поверхні, покращивши графітизацію або змінивши функціональність поверхні шляхом легування гетероатомами. Усі ці властивості біовуглецю надзвичайно корисні для використання його для зберігання водню або для зберігання енергії (у батареях і суперконденсаторах) [12].

Хімічний склад біовуглецю дуже різноманітний і багато в чому залежить від хімічного складу субстратів, того, як відбувається піроліз, а також від параметрів процесу. Відносно стабільний органічний вуглець, що

вилугується, і зола складають біовуглець. Вони містять аліфатичні сполуки, окислені сполуки вуглецю та ароматичні сполуки, які легко розкладаються. Біовугілля та інші модифіковані форми використовуються для очищення стічних вод сільського господарства. Виявлено високу адсорбцію поширених пестицидів біовугіллям, отриманим шляхом піролізу рисового лушпиння з попередньою кислотною обробкою. У першу чергу адсорбційна здатність біовугілля залежить від його об'єму пор і рН [18 - 20].

Вплив початкової концентрації забруднення на ефективність його видалення. Ефективність ступеня видалення забруднення в залежності від його початкової концентрації в розчині з застосуванням біовугілля зазначено на рис. 3. На основі результатів

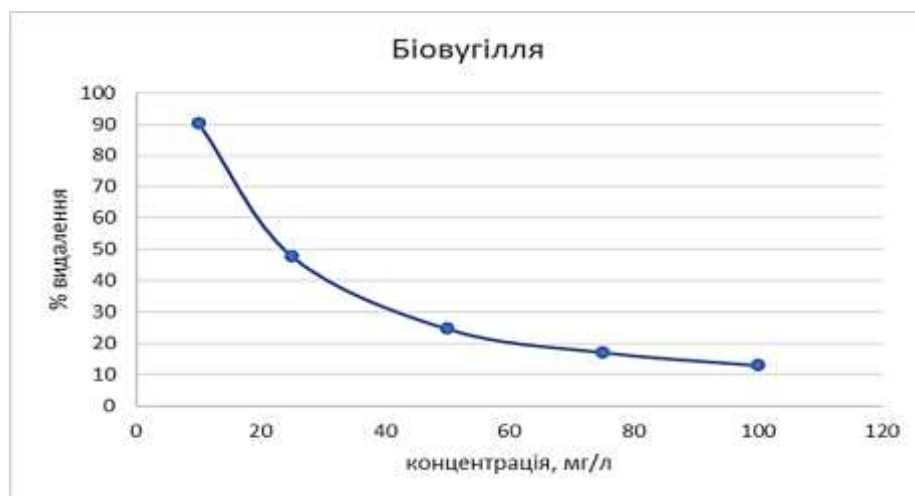


Рис. 3 – Вплив початкової концентрації забруднення на ефективність видалення забруднення

Fig. 3 – Influence of initial pollutant concentration on removal efficiency

дослідження можна констатувати: що при зменшенні концентрації забруднення ефективність видалення цього забруднення із застосуванням біовугілля покращується.

Вплив дози біовугілля на ефективність видалення забруднення. Доза сорбенту є важливим чинником, що впливає на ефективність видалення малахітового зеленого із водного розчину під час сорбції. Більша кількість сорбенту забезпечує більшу площу контакту та питому поверхню, що сприяє інтенсивнішому поглинанню барвника.. Залежність ефективності видалення

забруднення від дози біовугілля представлено на рис. 4. Отже, зі збільшенням дози біовугілля ефективність вилучення забруднення з водного розчину підвищується. Подальше збільшення дози сорбенту не призвело до подальшого зниження концентрацій забруднення у розчині. Доза біовугілля, за якої ефективність видалення забруднення визначена найвищою (89%, 91%, 93% 92%, відповідно) становила 0,2 г.

Ефективність вилучення забруднення залежно від значення рН водного розчину. На рисунку 5 подано діаграму ефе-

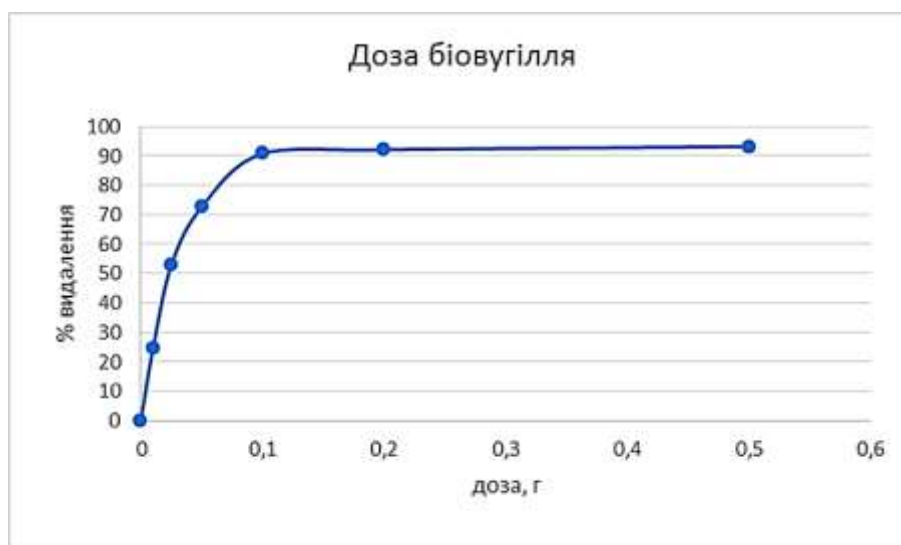


Рис. 4 – Ефективність ступеня видалення забруднення з водного розчину в залежності від дози біовугілля

Fig. 4 – Efficiency of pollutant removal from the aqueous solution depending on the biochar dose

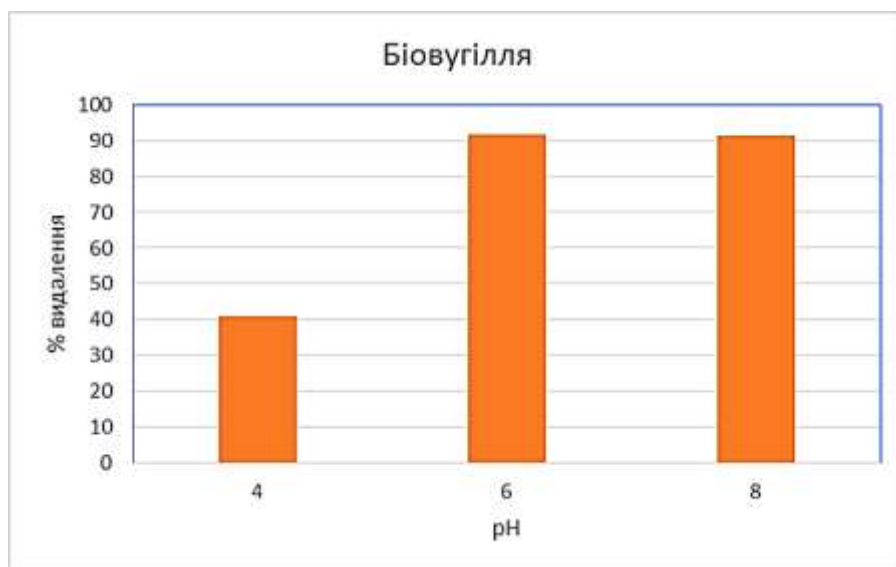


Рис. 5 – Ефективність вилучення забруднення залежно від значення рН водного розчину

Fig. 5 – Pollutant removal efficiency depending on the pH value of the aqueous solution

ктивності вилучення забруднення від рН, визначено, що в діапазоні рН-4-8 відбувається вилучення забруднення з модельного водного розчину за допомогою біовугілля. Спостерігається поступове зростання ефективності вилучення забруднення, що за рН 6 та 8 досягала свого максимального значення.

Ефективність ступеня видалення забруднення в залежності від часу контакту показано на рис. 6. Аналізуючи ефекти, зображені на графіку, показали, що зі збільшенням часу контакту ефективність видалення забруднювача малахітового зеленого зростала до тих пір, поки в цьому випадку не встановився стан адсорбційної рівноваги 60-120 хв.

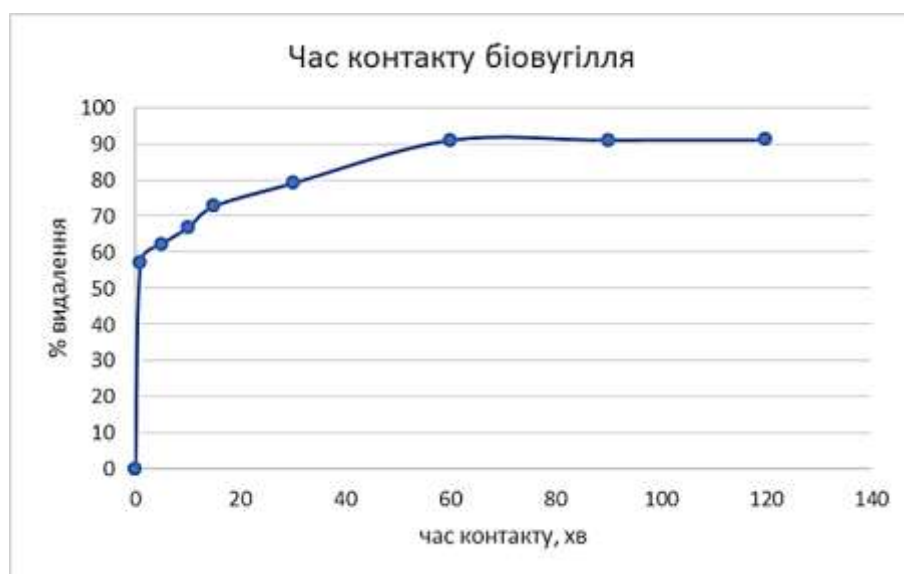


Рис. 6 – Ефективність ступеня видалення забруднення в залежності від часу контакту
Fig. 6 – Efficiency of pollutant removal depending on contact time

Висновки

Сильна адсорбція барвника малахітового зеленого на біовугіллі допомагає зменшити його концентрацію у стічних водах, що відповідно, знижує екологічні ризики, пов'язані з хімічними забруднювачами такого типу.

РН середовища значно впливає на якість видалення малахітового зеленого.

Високі концентрації барвника ускладнюють досягнення повного видалення. Найефективніше очищення досягається при низьких початкових концентраціях малахітового зеленого.

Збільшення часу контакту між біовугіллям і барвником підвищує ефективність

очищення, оскільки продовжується процес їх взаємодії. Однак надмірне збільшення часу може призвести до насичення сорбенту і, як наслідок, зменшити ефективність.

Встановлено, що біовугілля є ефективним сорбентом для видалення забруднювачів із водних розчинів завдяки своїм фізико-хімічним властивостям: великій питомій поверхні, розвиненій пористості та наявності активних функціональних груп. Біовугілля є перспективним матеріалом для впровадження в системи очищення стічних вод у промисловості, сільському господарстві та побуті.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Василюк О. В., Шматков А. А. Використання біовугілля для очищення стічних вод. *Екологічна безпека та природокористування*. 2021. 2. С. 45–52.
2. Dalahmer S, Fhrens L. et al. Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm. *Science of the Total Environment*. 2018. 612, 192–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.178>
3. Loeb sack G., Yeungen K., Berruti F., Klinghoffer N. Impact of biochar physical properties on adsorption mechanisms for removal of aromatic aqueous contaminants in water. *Biomass and Bioenergy*. 2025. 194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107617>
4. Ding Y. et al. Competitive removal of Cd(II) and Pb(II) by biochars produced from water hyacinths: performance and mechanism. *RSC Advances*. 2016. 6(7). 5223–5232. DOI: <https://doi.org/10.1039/c5ra26248h>
5. Deng S., Chen J., Chang J. Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: Performance and ecological benefits. *Journal of Cleaner Production*. 2021. 293. 126156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126156>
6. Peres-Mercado L., Lalander C. et al. Potential of Biochar Filters for Onsite Wastewater Treatment: Effects of Biochar Type, Physical Properties and Operating Conditions. 2018. 10(12). 1835. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10121835>
7. Kulbir Singh, Chhotu Ram, Sadiq Abdullahi Waziri. Removal of Heavy Metals by Adsorption using Agricultural based Residue: A Review. *Research Journal of Chemistry and Environment*. 2018. 22(5). 66–74. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/327282916>
8. Kumar A., Dabodiya T. S., Ramamoorthy D. Biochar-Based Nanocomposites for the Removal of Organic Environmental Contaminants. 2023. 85–92. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-28873-9_7
9. Ambaye T. G, Vaccari M. (2020). Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03060-w>
10. Wang X, Guo Z, Hu Z, Zhang J. Recent advances in biochar application for water and wastewater treatment: a review. *PeerJ* 8:e9164.2020. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.9164>
11. Salman M. Application of Engineered Biochar for Wastewater Treatment: A Way Forward to Environmental Pollution Remediation. *Catalytic Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Green Approach Towards Environment Restoration*. 2024. 1(12), 265–290. DOI: <https://doi.org/10.1021/bk-2024-1478.ch012>
12. Goswami L., Kushwaha A. Surface Modification of Biochar for Dye Removal from Wastewater. *Catalysts*. 2022. 12(8). 812. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal12080817>
13. Chen B., Chen Z., Lv S. A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresource Technology*. 2011. 102(2). 716–723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>
14. Farid M. A. et al. A holistic treatment system for palm oil mill effluent by incorporating the anaerobic-aerobic-wetland sequential system and a convective sludge dryer. *Chemical Engineering Journal*. 2019. 369. 195–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.033>
15. J.-B. Chai et al. Adsorption of heavy metal from industrial wastewater onto low-cost Malaysian kaolin clay-based adsorbent. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. 27(12). 13949–13962. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07755-y>
16. M. R. F. Banu et al. Biochar: A Black Carbon for Sustainable Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2023. 13(6). 418–432. DOI: <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i61840>
17. G. Palani et al. Current Trends in the Application of Nanomaterials for the Removal of Pollutants from Industrial Wastewater Treatment—A Review. *Molecules*. 2021. 26(9). 2799. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26092799>
18. Lehmann J., Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2nd ed. London : Routledge, 2015. 928 p. URL: https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/11/prelim_ch1_2015biocharforenvironmentalmanagement_text.pdf
19. Xie T, R. Reddy K., Wang C., Yargicoglu E., Spokas K. Characteristics and Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Review. *Critical Reviews In Environmental Science and Technology*. 2014. 45(9), 939–969. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.924180>
20. Foong S.Y. et al. Acing wastewater treatment with engineered biochar from microwave-assisted approach - A comprehensive review. *Environmental Technology & Innovation*. 2024. 36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103835>

Z. V. LAVRYNYUK¹, PhD (Chemistry), Associate Prof.,
Associate Professor of the Department of Ecology and Protection of Environment,
e-mail: lavrynyuk.zoryana@vnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1906-3330>

O. A. KARAIM¹, PhD (Economics), Associate Prof.,
Associate Professor of the Department of Ecology and Protection of Environment,
e-mail: olha.karaim@vnu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1722-4110>

¹Lesya Ukrainka Volyn National University,
13 Voli Ave., Lutsk, Volyn region, 43025, Ukraine

V. T. DUBENSKA¹,
Master's Student,
e-mail: dubenska2003@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-0280-9029>

ENVIRONMENTAL PRINCIPLES OF USING BIOCHAROL FOR WASTEWATER TREATMENT

Purpose. To study the effectiveness of using biochar as a sorbent for wastewater treatment from organic and inorganic pollutants on the adsorption process, as well as to assess the environmental feasibility and possibility of reusing biochar in water treatment technologies.

Methods. Experimental, adsorption atomic spectroscopy on the UNICAM Solaar 939 device, statistical.

Results. The influence of the initial concentration, pH of the medium, sorbent dose and contact time was studied. It was found that strong adsorption of pollutants on biochar in aqueous solutions reduces the mobilization of pollutants and helps reduce the risk associated with toxic chemicals and their by-products that are present in wastewater and can negatively affect the environment. The pH value of the medium significantly affects the surface charge and specification of chemicals in all biochar sorbents. High concentrations of pollutants complicate complete removal. The use of biochar removes contaminants best in conditions of low initial concentrations of contaminants. The efficiency of purification increases with the contact time, which is associated with the duration of the process between biochar and the contaminant. However, an excessive increase in time can lead to saturation, which will limit the efficiency of contaminant removal. The ecological safety of the use of biochar and its suitability for repeated use with minimal loss of sorption properties have also been confirmed.

Conclusions. It has been established that biochar is an effective sorbent for the removal of contaminants from aqueous solutions due to its physicochemical properties: large specific surface area, developed porosity and the presence of active functional groups. Biochar is a promising material for implementation in wastewater treatment systems in industry, agriculture and everyday life. Key words: water pollution, adsorption, biochar, wastewater, concentration, pH.

References

1. Vasilyuk O. V., Shmatkov A. A. (2021). Use of biochar for wastewater treatment. Ecological safety and nature management. 2. 45-52. (in Ukrainian).
2. Dalahmer, S, Fhrens, L. (2018). Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm. *Science of the Total Environment*, 612, 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.178>
3. Loeb sack, G., Yeungen, K., Berruti, F., Klinghoffer N. (2025). Impact of biochar physical properties on adsorption mechanisms for removal of aromatic aqueous contaminants in water. *Biomass and Bioenergy*. 194. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107617>
4. Ding, Y. (2016). Competitive removal of Cd(ii) and Pb(ii) by biochars produced from water hyacinths: performance and mechanism. *RSC Advances*. 6(7). 5223–5232. <https://doi.org/10.1039/c5ra26248h>
5. Deng, S., Chen, J., Chang, J. (2021). Application of biochar as an innovative substrate in constructed wetlands/biofilters for wastewater treatment: Performance and ecological benefits. *Journal of Cleaner Production*. 293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126156>
6. Peres-Mercado L., Lalander C. (2018). Potential of Biochar Filters for Onsite Wastewater Treatment: Effects of Biochar Type, Physical Properties and Operating Conditions. 10(12). 1835. <https://doi.org/10.3390/w10121835>
7. Kulbir Singh, Chhotu Ram, Sadiq Abdullahi Waziri. (2018). Removal of Heavy Metals by Adsorption using Agricultural based Residue: A Review. *Research Journal of Chemistry and Environment* https://doi.org/10.3390/w10121835. 22(5). 66–74. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/327282916>

8. Kumar, A., Dabodiya, T.S., Ramamoorthy, D. (2023) Biochar-Based Nanocomposites for the Removal of Organic Environmental Contaminants, 85-92. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28873-9_7
9. Ambaye T. G, Vaccari M. (2020). Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03060-w>
10. Wang X, Guo Z, Hu Z, Zhang J. (2020) Recent advances in biochar application for water and wastewater treatment: a review. *PeerJ* 8:e9164. <https://doi.org/10.7717/peerj.9164>
11. Salman M. (2024). Application of Engineered Biochar for Wastewater Treatment: A Way Forward to Environmental Pollution Remediation. Catalytic Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Green Approach Towards Environment Restoration, 1(12), 265-290. <https://doi.org/10.1021/bk-2024-1478.ch012>
12. Goswami, L., Kushwaha, A. (2022). Surface Modification of Biochar for Dye Removal from Wastewater. *Catalysts*, 12(8), 812, <https://doi.org/10.3390/catal12080817>
13. Chen, B., Chen, Z., Lv, S. (2011). A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresource Technology*, 102(2), 716–723. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>
14. Farid, M. A. (2019). A holistic treatment system for palm oil mill effluent by incorporating the anaerobic-aerobic-wetland sequential system and a convective sludge dryer. *Chemical Engineering Journal*, 369, 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.033>
15. J.-B. Chai (2020). Adsorption of heavy metal from industrial wastewater onto low-cost Malaysian kaolin clay-based adsorbent. *Environmental Science and Pollution Research*. 27(12), 13949–13962. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07755-y>
16. M. R. F. Banu. (2023). Biochar: A Black Carbon for Sustainable Agriculture. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(6), 418–432. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i61840>
17. G. Palani et al.(2021). Current Trends in the Application of Nanomaterials for the Removal of Pollutants from Industrial Wastewater Treatment—A Review. *Molecules*, 26(9), 2799. <https://doi.org/10.3390/molecules26092799>
18. Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2nd ed. London: Routledge, 928. https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/11/prelim_ch1_2015biocharforenvironmentalmanagement_text.pdf
19. Xie,T. R., Reddy, K., Wang, C., Yargicoglu, E.,& Spokas, K. (2014). Characteristics and Applications of Biochar for Environmental Remediation: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 45(9), 939–969. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.924180>
20. Foong, S. Y., Chin, B.L.F., Lock, S.S.M., Yiin,C.L., Tan, Y.H., Zheng,G., Ge,S., Liew, R.K., Lam, S.S. (2024). Acing wastewater treatment with engineered biochar from microwave-assisted approach – A comprehensive review. *Environmental Technology & Innovation*, 36, <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103835>

The article was received by the editors 29.04.2025

The article is recommended for printing 01.06.2025