

ANALYSIS OF WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES USING WASTE FROM POWER PLANTS AS ADSORBENT

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В ЯКОСТІ АДСОРБЕНТУ

Iryna V. Zalevska

i.zalevska@ecolog.sumdu.edu.ua

ORCID: 0009-0007-8951-6204

Larysa L. Hurets

l.gurets@ecolog.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-2318-4223

І. В. Залевська,

аспірант

Л. Л. Гурець,

д-р техн. наук, професор

Sumy State University, Sumy

Сумський державний університет, м. Суми

Abstract. The continuous increase in pollution of water bodies due to anthropogenic influence, including military actions, requires an immediate search for new safe, economically viable, and easy-to-maintain methods of purification. Fly ash residues from thermal power plants, which are a complex mixture of mineral substances, accumulate in ash dumps and are considered environmental pollutants. For example, they can be used in road construction as building material or in wastewater treatment. Fly ashes can be used in wastewater treatment by adsorption, filtration, ion exchange, coagulation, or photocatalysis. Among these methods, adsorption is the most common, simple, environmentally safe, and effective method of wastewater treatment. Therefore, fly ashes are considered as an effective adsorbent in wastewater treatment processes by adsorption. Thermal power plant wastes are hardly utilized in Ukraine; instead, they accumulate in ash dumps, making them a cheap and widespread raw material for wastewater treatment. Hence, this study analyzes the potential of using fly ash residues from thermal power plants as an effective adsorbent for removing heavy metals from wastewater. The aim of the work is to analyze the possibility, feasibility, and safety of using thermal power plant wastes as adsorbents in wastewater treatment for heavy metal removal. Research results confirm that the chemical composition and properties of fly ash residues depend on the type of coal and the conditions of their formation. Fly ashes meet the main requirements for adsorbents regarding a large specific surface area, porosity, morphology, and their sorption capacity can be enhanced, and their chemical composition adjusted by acid, alkali treatment, or thermal processing. This method can be effective both in terms of wastewater treatment quality and from an economic perspective since the use of thermal power plant wastes as adsorbents contributes to their utilization and reduces the negative impact of ash dumps on the environment. Research results can serve as a scientific-theoretical basis for further optimization and practical implementation.

Key words: heavy metals; adsorption; wastewater treatment; adsorbent; ash and slag waste.

Анотація. Постійне зростання обсягів забруднення водних об'єктів внаслідок антропогенного впливу у тому числі через військові дії потребує негайного пошуку нових безпечних, економічно вигідних та легких в обслуговуванні методів очищення. Золошлакові відходи теплоелектростанцій, які є складною сумішшю мінеральних речовин, складаються в золошлакозакладах та вважаються забрудниками довкілля. Наприклад, вони можуть бути використані у будівництві доріг, як будівельний матеріал, в очищенні стічних вод. Золошлаки можуть бути використані в очищенні стічних вод методом адсорбції, фільтрації, іонообміну, коагуляції, фотокаталізу. Серед цих методів адсорбція є найпоширенішим, простим, екологічно безпечним та ефективним методом очищення стічних вод, тому розглядаються золошлаки як ефективний адсорбент у процесах очищення стічних вод методом адсорбції. Відходи теплоелектростанцій майже не утилізуються в Україні, а тільки накопичуються у золовідвалах, що робить їх дешевою та розповсюдженою сировиною для очищення стічних вод. Тому у цьому дослідженні проаналізовано потенціал використання золошлакових відходів теплоелектростанцій як ефективного адсорбента для очищення стічних вод від важких металів. Метою роботи є аналіз можливості, доцільності та безпечності використання відходів теплоелектростанцій в якості адсорбенту при очищенні стічних вод від важких металів. Результати досліджень підтверджують, що хімічний склад та властивості золошлакових відхо-

дів залежать від типу вугілля та умов їхнього утворення. Золашлаки відповідають основним вимогам до адсорбентів щодо великої питомої поверхні, пористості, морфології, а їх сорбційна ємність може бути покращення, а хімічний склад підлаштований за допомогою попередньої обробки кислотою, лугом або теплової обробки. Цей метод може бути ефективним як з точки зору якості очищення стічних вод, так і з економічної перспективи, оскільки використання відходів теплоелектростанцій як адсорбенту сприяє їхній утилізації та зменшує негативний вплив золовідвалів на навколишнє середовище. Результати досліджень можуть бути використані як науково-теоретичне підґрунтя для проведення подальших досліджень з оптимізації та реалізації на практиці.

Ключові слова: важкі метали; адсорбція; очищення стічних вод; адсорбент; золашлакові відходи.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Стрімкий ріст людської популяції призвів до надмірної експлуатації та деградації природних водних ресурсів, що несе в собі загрозу глобальній екосистемі та людству [1]. Обсяги води, яка використовується промисловими підприємствами, становлять 23 % від загального обсягу споживання води [2]. За результатами узагальнення даних державного обліку водокористування у 2021 році у поверхневій водні об'єкти скинуто 4684,6 млн. куб. м стічних вод, у тому числі: забруднені складають 541,5 млн. куб. м (11,6 %), нормативно-очищені – 1430 млн. куб. м (30,5 %) та нормативно-чисті без очистки – 2712,9 млн. куб. м (57,9 %) [3]. Неочищені або недоочищені стічні води підприємств з високим вмістом важких металів, потрапляючи у навколишнє середовище, призводять до важкопрогнозованих наслідків. Важкі метали не піддаються біодеструкції, мають довгий період напіввиведення та високий потенціал до біоаккумуляції [4]. Це призводить до підвищення їх концентрації в організмах з підвищенням трофічних рівнів, спричиняючи різноманітні захворювання та порушення, та зниження біодеградації органічних забруднювальних речовин, що посилює вплив інших токсикантів.

Постійне зростання обсягів забруднення водних об'єктів внаслідок антропогенного впливу у тому числі через військові дії потребує негайного пошуку

нових безпечних, економічно вигідних та простих в обслуговуванні методів очищення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

За останні 5 років стрімко зростає зацікавленість науковців у вирішенні проблеми впливу недоочищених та неочищених стічних вод на навколишнє середовище. За даними бази даних ScienceDirect за запитом «очищення стічних вод» зацікавленість зросла з 16 914 публікацій в 2018 році до 36 159 публікацій у 2023 році (рис. 1).

Для розробки раціональної схеми очищення стічних вод визначається їх склад, аналізуються фізико-хімічні показники. Найбільш розповсюджені методи очищення стічних вод узагальнені на рис. 2.

Найпоширеніші методи очищення стічних вод від важких металів включають адсорбцію, електрохімічні методи, нейтралізацію та осадження, іонообмін, мембранні методи розділення [5].

За даними автора [6] стічні води з високим вмістом важких металів зазвичай піддаються обробці традиційними хімічними методами на основі процесів окиснення/відновлення та хімічного осадження. Ефективність цієї технології сильно залежить від концентрації важких металів та продукує велику кількість осаду, тобто вона не є універсальною та маловідходною.



Рис. 1. Діаграма зростання зацікавленості науковців проблемою очищення стічних вод за даними бази даних ScienceDirect на основі кількості публікацій за запитом «очищення стічних вод»

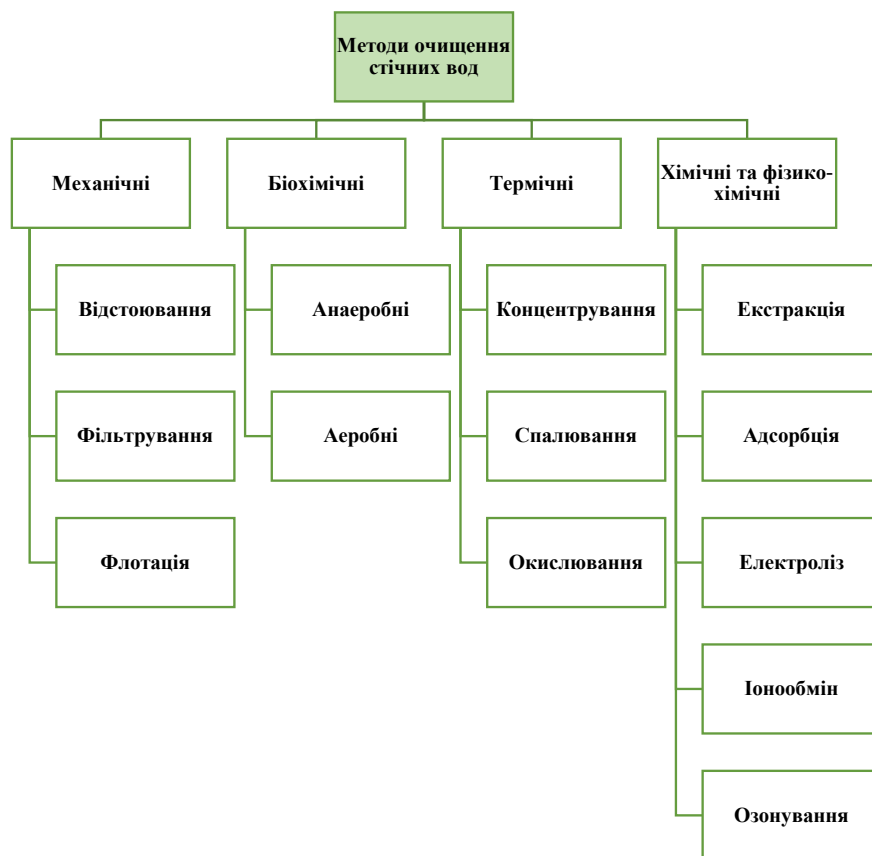


Рис. 2. Основні методи очищення стічних вод

Серед наявних методів адсорбція є найбільш поширеним, простим, екологічно безпечним [5] та ефективним методом очищення стічних вод від важких металів [7]. Невибаглива в обслуговуванні та гнучка, зокрема через велику різноманітність вибору адсорбенту, з ефективністю очищення від 70 % до 98 % в залежності від використаного адсорбенту та умов очищення [8].

Метод адсорбції використовує адсорбенти з великою площею поверхні та високою адсорбційною здатністю для видалення важких металів, ефективність видалення та селективність процесу адсорбції залежать від властивостей адсорбенту та характеристик стічних вод [9]. Цей метод передбачає концентрацію забруднювачів на поверхні або в порах адсорбенту і включає видалення іонів металу за рахунок змін активних груп та валентних станів [5].

Адсорбенти класифікуються за походженням, способом взаємодії з забруднювачами, за способом застосування. Значну увагу дослідників привертають адсорбційні методи очищення стічних вод із використанням як адсорбентів природних матеріалів чи повторним використанням відходів виробництва. Як адсорбенти найчастіше використовуються природний та синтетичний цеоліт [10], бентоніт [11], оксид алюмінію [5], оксид графену [12], вугілля [13],

адсорбенти, синтезовані з сільськогосподарських відходів [14; 15].

ВИОКРЕМЛЕННЯ НЕ ВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Процес очищення стічних вод з використанням адсорбентів різного виду не є новим, проте потребує постійного покращення і адаптації під сьогоденні реалії. Використання відходів теплоенергетики в процесі очищення стічних вод від важких металів дає подвійний ефект зменшення негативного впливу на навколишнє середовище:

- зменшення впливу золівидвалів на водне середовище, на атмосферне повітря та на ґрунти за рахунок введення відходів теплоенергетики у процеси очищення стічних вод;

- зменшення впливу поллютантів в стічних водах на водне середовище та ґрунти, а внаслідок зменшення негативного впливу на флору та фауну, та зокрема людину.

Тому дослідження способу використання відходів теплоенергетики в якості адсорбента для очищення стічних вод є актуальним.

Мета роботи – аналіз можливості та доцільності використання відходів теплоелектростанцій в якості адсорбенту при очищенні стічних вод від важких металів.

Об'єктом дослідження є явище забруднення стічних вод важкими металами.

Предмет досліджень є процеси очищення стічних вод від важких металів з використанням відходів теплоелектростанцій.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

За хімічним складом золошлакові відходи представляють собою складну суміш різних, переважно мінеральних, речовин, вміст яких залежить від типу вугілля. Для паливно-енергетичного комплексу України притаманне використання вугілля різних марок, що призводить до варіювання хімічного складу золошлаків. Основними компонентами є кисневі сполуки кремнію, заліза, кальцію, магнію [16].

Відходи теплоелектростанцій вважають забруднювачем довкілля, але використовують у багатьох областях. Наприклад, його використовують при виробництві цементу [17], дорожнього покриття [18] та як перспективний адсорбент для очищення вод [19].

Золошлакові відходи є широко розповсюдженими та майже не утилізуються в Україні, адже золовідвали більшості теплоелектростанцій переповнені, вже накопичено більш ніж 1000 млн тон відходів і щорічно накопичується ще 7 млн тон [16].

Золошлакові відходи можуть бути використані у очищенні стічних вод методом адсорбції (як адсорбент), фільтрації (як фільтруючий матеріал), іонообміну (як іонообмінний матеріал), коагуляції (як коагулянт), фотокаталізу (як носій фотокаталізатору) [20]. Шляхи використання золошлакових відходів у методах очищення стічних вод узагальнені на рис. 3.



Рис. 3. Використання золошлакових відходів у методах очищення стічних вод.

Використання золошлакових відходів теплоелектростанцій як адсорбенту у процесах очищення вод від важких металів є перспективним методом.

Золошлакові відходи відповідають основним вимогам для сорбентів щодо великої питомої поверхні, пористості, морфології, хімічного складу [19], сорбційної активності, безпечності у використанні та доступності [21].

Хімічний склад та властивості золошлакових відходів сильно залежать від початкової сировини, умов спалювання та типу використаного обладнання [22]. Для того, щоб точно знати властивості золошлакових відходів, необхідно дослідити мінералогічний, елементний, оксидний і радіонуклідний склад відходів, структуру їх поверхні, сорбційну і гідравлічну активності, поведінку мінералів при нагріванні [16]. Для дослідження адсорбційного матеріалу авторами [22] використовувалась атомно-абсорбційна спектроскопія, колориметрія та гравіметричний аналіз.

Автори [19] наголошують про можливе вторинне забруднення через вимивання небезпечних елементів (свинець, мідь, цинк, кадмій) із золошлакових адсорбентів, а також про зменшення вимивання елементів з підвищенням лужності золошлаку, що потребує додаткових досліджень для вивчення екологічного впливу. Оптимальне значення рН, що відповідає максимальній адсорбції, було виявлено між 5,5 та 6,6 [22; 23].

Для використання золошлаків у якості адсорбенту необхідний постійний контроль безпечності використаної сировини для уникнення можливого вторинного забруднення під час проведення процесу адсорбції [19], а також для недопущення негативного впливу на людину [24].

Через обмежену ємність адсорбції, автори [20] вважають хімічні модифікації необхідними для покращення ефективності видалення забруднювачів. Хімічний склад золошлаків може бути покращений за допомогою попередньої обробки кислотою, лугом або теплової обробки. Для підвищення адсорбційної ємності може бути використана помірна гідротермальна обробка, яка створює матеріал зі співвідношенням $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ понад 2,4, що має гладку та рівну структуру, та є високо полярною [22].

Для виявлення переваг та недоліків використання золошлаків в якості адсорбента при очищенні стічних вод, нами був проведений SWOT-аналіз, результати якого представлені в табл. 1

Узагальнюючи подану у Табл. 1 інформацію, метод очищення стічних вод з використанням золошлакових відходів як адсорбенту має значний потенціал, що відображається у високій ефективності очищення та економічній вигоді. Однак, для успішного впровадження цього методу необхідно вирішити питання щодо контролю якості та безпеки використання відходів, а також розробити стратегії для подальшого розвитку та покращення методу з урахуванням загроз, які можуть виникати через специфічність обраного адсорбенту.

Таблиця 1. SWOT-аналіз метода очищення стічних вод з використанням золошлакових відходів у якості адсорбенту

Сильні сторони (Strengths):	Слабкі сторони (Weaknesses):
Висока ефективність: Золошлакові відходи можуть бути ефективними адсорбентами для видалення забруднюючих речовин зі стічних вод з ефективністю очищення 70-99%.	Варіативність складу: Склад золошлакових відходів сильно варіюється в залежності від використаної первинної сировини (типу вугілля), що може вплинути на їхню ефективність як адсорбентів.
Низька вартість адсорбента: Золошлакові відходи утворюються у великих кількостях та майже не утилізуються, що робить їх використання відносно недорогим в порівнянні з іншими адсорбентами.	Можливість вторинного забруднення: Золошлакові відходи можуть містити важкі метали та інші шкідливі речовини, які можуть бути випущені в стічні води, якщо не виконано належні заходи контролю.
Використання відходів: Використання золошлакових відходів як адсорбентів сприяє їх утилізації та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.	
Можливості (Opportunities):	Загрози (Threats):
Додаткові дослідження та розвиток: Можливість подальших досліджень та розвитку може допомогти вдосконалити метод і покращити його ефективність.	Конкуренція з іншими методами очищення: Існує конкуренція з іншими методами очищення стічних вод, які також можуть бути ефективними.
Партнерства з теплоелектростанціями: Співпраця з теплоелектростанціями може забезпечити стабільне постачання золошлакових відходів для використання в якості адсорбентів.	Регуляторні обмеження: Законодавство у сфері регулювання поводження з відходами може вплинути на використання золошлакових відходів як адсорбентів.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Згідно проведених досліджень золошлакові відходи мають потенціал використовуватись як адсорбент при очищенні стічних вод від важких металів, що також підтверджується дослідженнями авторів робіт [22; 23; 8]. Золошлакові відходи можуть ефективно використовуватись також для очищення стічних вод від барвників [25; 26], органічних забруднень [20], а також деяких лікарських препаратів (парацетамол, ібупрофен, ципрофлоксацин) [27], що дозволяє розглядати золошлаки як адсорбент при очищенні стічних вод від різних галузей промисловості, забруднених сукупністю полютантів, а також муніципальних стічних вод.

ВИСНОВКИ

Враховуючи переваги використання золошлакових відходів у процесах очищення стічних вод, варто підкреслити значення цього методу для забезпечення сталого розвитку та збереження довкілля. Використання таких відходів як адсорбенту виявляється ефективним не лише з екологічної точки зору, а й з економічної, оскільки воно сприяє утилізації великих

обсягів відходів та зниженню витрат на їхню утилізацію.

Хімічний склад, а також адсорбційні можливості золошлакових відходів варіюються в залежності від сировини (типу вугілля), що потрібно враховувати для кожного окремого випадку та джерела утворення відходів. А також треба враховувати важливість недопущення непідготовленої та не перевіреної на безпечність сировини до процесу очищення стічних вод для уникнення повторного забруднення вод, а також негативного впливу на людину.

Усі ці переваги роблять використання золошлакових відходів у процесах очищення стічних вод цікавою та перспективною альтернативою, яка може сприяти покращенню якості навколишнього середовища і стічних вод, а також економічній ефективності утилізації відходів.

Проведений огляд поставив задачу подальшого дослідження токсичних властивостей золошлакових відходів Сумської ТЕЦ методом біотестування, а також аналізу їх структурного складу з метою розробки технології адсорбційного очищення стічних вод

REFERENCES

- [1] Xu, Z., Zhang, Q., Li, X., & Huang, X. (2022). A critical review on chemical analysis of heavy metal complexes in water/wastewater and the mechanism of treatment methods. *Chemical Engineering Journal*, 429, 131688. doi: 10.1016/J.CEJ.2021.131688
- [2] Blanco-Vieites, M., Suárez-Montes, D., Delgado, F., Álvarez-Gil, M., Battez, A. H., & Rodríguez, E. (2022). Removal of heavy metals and hydrocarbons by microalgae from wastewater in the steel industry. *Algal Research*, 64, 102700. doi: 10.1016/J.ALGAL.2022.102700
- [3] Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. (2022). Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha Ukrainy u 2021 rotsi [National Report on the State of the Environment of Ukraine in 2021]. Kyiv. [in Ukrainian].

- [4] Ahmaruzzaman, M. (2011). Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166(1–2), 36–59. doi: 10.1016/J.CIS.2011.04.005
- [5] Wang, Q., Wang, B., Ma, Y., Zhang, X., Lyu, W., & Chen, M. (2022). Stabilization of heavy metals in biochar derived from plants in antimony mining area and its environmental implications. *Environmental Pollution*, 300, 118902. doi: 10.1016/J.ENVPOL.2022.118902
- [6] Shrestha, R., Ban, S., Devkota, S., Sharma, S., Joshi, R., Tiwari, A. P., Kim, H. Y., & Joshi, M. K. (2021). Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105688. doi: 10.1016/J.JECE.2021.105688
- [7] Wang, S., & Wu, H. (2006). Environmental-benign utilisation of fly ash as low-cost adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 482–501. doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2006.01.067
- [8] Shahrokhi-Shahraki, R., Benally, C., El-Din, M. G., & Park, J. (2021). High efficiency removal of heavy metals using tire-derived activated carbon vs commercial activated carbon: Insights into the adsorption mechanisms. *Chemosphere*, 264, 128455. doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.128455
- [9] Zou, H. T., Xu, K., Yang, A., Hu, X., Niu, A., & Li, Q. (2022). Antimony accumulation in zebrafish (*Danio rerio*) and its effect on genotoxicity, histopathology, and ultrastructure. *Aquatic Toxicology*, 252, 106297. doi: 10.1016/J.AQUATOX.2022.106297
- [10] Feng, C., E, J., Han, W., Deng, Y., Zhang, B., Zhao, X., & Han, D. (2021). Key technology and application analysis of zeolite adsorption for energy storage and heat-mass transfer process: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110954. doi: 10.1016/J.RSER.2021.110954
- [11] Mohammed, A. A., & Ali, D. K. (2023). Bentonite-layered double hydroxide composite as potential adsorbent for removal of Abamectin pesticide from wastewater. *Results in Surfaces and Interfaces*, 10, 100099. doi: 10.1016/J.RSURFI.2023.100099
- [12] Joshi, N. C., & Gururani, P. (2022). Advances of graphene oxide based nanocomposite materials in the treatment of wastewater containing heavy metal ions and dyes. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100306. doi: 10.1016/J.CRGSC.2022.100306
- [13] Kumar, N., Pandey, A., Rosy, & Sharma, Y. C. (2023). A review on sustainable mesoporous activated carbon as adsorbent for efficient removal of hazardous dyes from industrial wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 104054. doi: 10.1016/J.JWPE.2023.104054
- [14] Ahmed, R. S., Abuarab, M. E., Baiomy, M. A., & Ibrahim, M. M. (2024). Heavy metals removal from industrial wastewater using bio-adsorbent materials based on agricultural solid wastes through batch and continuous flow mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104665. doi: 10.1016/J.JWPE.2023.104665
- [15] Awogbemi, O., & Kallon, D. V. Von. (2023). Progress in agricultural waste derived biochar as adsorbents for wastewater treatment. *Applied Surface Science Advances*, 18, 100518. doi: 10.1016/J.APSADV.2023.100518
- [16] Yatsyshyn, A. V., Matvieieva, I. V., Kovach, V. O., Artemchuk, V. O., & Kameneva, I. P. (2018). Osoblyvosti vplyvu zolovidaliv pidpriemstv teploenerhetyky na navkolyshnie seredovyshche [Peculiarities of the environmental impact of ash dumps of thermal power plants]. *Problemy Nadzvychaynykh Sytuatsii*, 28(2), 57–68. doi: 10.5281/zenodo.2594489 [in Ukrainian].
- [17] Mousa, A. (2023). Utilization of coal bottom ash from thermal power plants as a cement replacement for building: A promising sustainable practice. *Journal of Building Engineering*, 74, 106885. doi: 10.1016/J.JOBE.2023.106885
- [18] Nguyen Thi, N., Bui Truong, S., & Do Minh, N. (2021). Reusing coal ash of thermal power plant in a pavement base course. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(5), 346–354. doi: 10.1016/J.JKSUES.2020.09.017
- [19] Singh, N. B., Agarwal, A., De, A., & Singh, P. (2022). Coal fly ash: an emerging material for water remediation. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(3), 44. doi: 10.1007/s40789-022-00512-1
- [20] Mushtaq, F., Zahid, M., Bhatti, I. A., Nasir, S., & Hussain, T. (2019). Possible applications of coal fly ash in wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 240, 27–46. doi: 10.1016/J.JENVMAN.2019.03.054
- [21] Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. doi: 10.1016/J.CEJ.2009.09.013
- [22] Visa, M., Isac, L., & Duta, A. (2012). Fly ash adsorbents for multi-cation wastewater treatment. *Applied Surface Science*, 258(17), 6345–6352. doi: 10.1016/J.APSUSC.2012.03.035
- [23] Lekgoba, T., Ntuli, F., & Falayi, T. (2021). Application of coal fly ash for treatment of wastewater containing a binary mixture of copper and nickel. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101822. doi: 10.1016/J.JWPE.2020.101822
- [24] Yadav, A. K. (2021). Human health risk assessment in opencast coal mines and coal-fired thermal power plants surrounding area due to inhalation. *Environmental Challenges*, 3, 100074. doi: 10.1016/J.ENVC.2021.100074
- [25] Dinçer, A. R., Güneş, Y., & Karakaya, N. (2007). Coal-based bottom ash (CBBA) waste material as adsorbent for removal of textile dyestuffs from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 529–535. doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2006.07.064
- [26] Dinçer, A. R., Güneş, Y., Karakaya, N., & Güneş, E. (2007). Comparison of activated carbon and bottom ash for removal of reactive dye from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 98(4), 834–839. doi: 10.1016/J.BIORTECH.2006.03.009
- [27] Malakootian, M., Faraji, M., Malakootian, M., & Nozari, M. (2021). Ciprofloxacin removal from aqueous media by adsorption process: a systematic review and meta-analysis. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 229, 252–282. doi: 10.5004/dwt.2021.27334

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Xu, Z., Zhang, Q., Li, X., & Huang, X. (2022). A critical review on chemical analysis of heavy metal complexes in water/wastewater and the mechanism of treatment methods. *Chemical Engineering Journal*, 429, 131688. doi: 10.1016/J.CEJ.2021.131688
- [2] Blanco-Vieites, M., Suárez-Montes, D., Delgado, F., Álvarez-Gil, M., Battez, A. H., & Rodríguez, E. (2022). Removal of heavy metals and hydrocarbons by microalgae from wastewater in the steel industry. *Algal Research*, 64, 102700. doi: 10.1016/J.ALGAL.2022.102700

- [3] Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2022). Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища України у 2021 році. Київ.
- [4] Ahmaruzzaman, M. (2011). Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166(1–2), 36–59. doi: 10.1016/J.CIS.2011.04.005
- [5] Wang, Q., Wang, B., Ma, Y., Zhang, X., Lyu, W., & Chen, M. (2022). Stabilization of heavy metals in biochar derived from plants in antimony mining area and its environmental implications. *Environmental Pollution*, 300, 118902. doi: 10.1016/J.ENVPOL.2022.118902
- [6] Shrestha, R., Ban, S., Devkota, S., Sharma, S., Joshi, R., Tiwari, A. P., Kim, H. Y., & Joshi, M. K. (2021). Technological trends in heavy metals removal from industrial wastewater: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105688. doi: 10.1016/J.JECE.2021.105688
- [7] Wang, S., & Wu, H. (2006). Environmental-benign utilisation of fly ash as low-cost adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 482–501. doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2006.01.067
- [8] Shahrokhi-Shahraki, R., Benally, C., El-Din, M. G., & Park, J. (2021). High efficiency removal of heavy metals using tire-derived activated carbon vs commercial activated carbon: Insights into the adsorption mechanisms. *Chemosphere*, 264, 128455. doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.128455
- [9] Zou, H. T., Xu, K., Yang, A., Hu, X., Niu, A., & Li, Q. (2022). Antimony accumulation in zebrafish (*Danio rerio*) and its effect on genotoxicity, histopathology, and ultrastructure. *Aquatic Toxicology*, 252, 106297. doi: 10.1016/J.AQUATOX.2022.106297
- [10] Feng, C., E, J., Han, W., Deng, Y., Zhang, B., Zhao, X., & Han, D. (2021). Key technology and application analysis of zeolite adsorption for energy storage and heat-mass transfer process: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110954. doi: 10.1016/J.RSER.2021.110954
- [11] Mohammed, A. A., & Ali, D. K. (2023). Bentonite-layered double hydroxide composite as potential adsorbent for removal of Abamectin pesticide from wastewater. *Results in Surfaces and Interfaces*, 10, 100099. doi: 10.1016/J.RSURFI.2023.100099
- [12] Joshi, N. C., & Gururani, P. (2022). Advances of graphene oxide based nanocomposite materials in the treatment of wastewater containing heavy metal ions and dyes. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 5, 100306. doi: 10.1016/J.CRGSC.2022.100306
- [13] Kumar, N., Pandey, A., Rosy, & Sharma, Y. C. (2023). A review on sustainable mesoporous activated carbon as adsorbent for efficient removal of hazardous dyes from industrial wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 104054. doi: 10.1016/J.JWPE.2023.104054
- [14] Ahmed, R. S., Abuarab, M. E., Baiomy, M. A., & Ibrahim, M. M. (2024). Heavy metals removal from industrial wastewater using bio-adsorbent materials based on agricultural solid wastes through batch and continuous flow mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104665. doi: 10.1016/J.JWPE.2023.104665
- [15] Awogbemi, O., & Kallon, D. V. Von. (2023). Progress in agricultural waste derived biochar as adsorbents for wastewater treatment. *Applied Surface Science Advances*, 18, 100518. doi: 10.1016/J.APSADV.2023.100518
- [16] Яцишин, А. В., Матвєєва, І. В., Ковач, В. О., Артемчук, В. О., & Каменєва, І. П. (2018). Особливості впливу золівідвалів підприємств теплоенергетики на навколишнє середовище. *Проблеми Надзвичайних Ситуацій*, 28(2), 57–68. doi: 10.5281/zenodo.2594489
- [17] Mousa, A. (2023). Utilization of coal bottom ash from thermal power plants as a cement replacement for building: A promising sustainable practice. *Journal of Building Engineering*, 74, 106885. doi: 10.1016/J.JOBE.2023.106885
- [18] Nguyen Thi, N., Bui Truong, S., & Do Minh, N. (2021). Reusing coal ash of thermal power plant in a pavement base course. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 33(5), 346–354. doi: 10.1016/J.JKSUES.2020.09.017
- [19] Singh, N. B., Agarwal, A., De, A., & Singh, P. (2022). Coal fly ash: an emerging material for water remediation. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9(3), 44. doi: 10.1007/s40789-022-00512-1
- [20] Mushtaq, F., Zahid, M., Bhatti, I. A., Nasir, S., & Hussain, T. (2019). Possible applications of coal fly ash in wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 240, 27–46. doi: 10.1016/J.JENVMAN.2019.03.054
- [21] Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 2–10. doi: 10.1016/J.CEJ.2009.09.013
- [22] Visa, M., Isac, L., & Duta, A. (2012). Fly ash adsorbents for multi-cation wastewater treatment. *Applied Surface Science*, 258(17), 6345–6352. doi: 10.1016/J.APSUSC.2012.03.035
- [23] Lekgoba, T., Ntuli, F., & Falayi, T. (2021). Application of coal fly ash for treatment of wastewater containing a binary mixture of copper and nickel. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101822. doi: 10.1016/J.JWPE.2020.101822
- [24] Yadav, A. K. (2021). Human health risk assessment in opencast coal mines and coal-fired thermal power plants surrounding area due to inhalation. *Environmental Challenges*, 3, 100074. doi: 10.1016/J.ENVCL.2021.100074
- [25] Dinçer, A. R., Güneş, Y., & Karakaya, N. (2007). Coal-based bottom ash (CBBA) waste material as adsorbent for removal of textile dyestuffs from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 141(3), 529–535. doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2006.07.064
- [26] Dinçer, A. R., Güneş, Y., Karakaya, N., & Güneş, E. (2007). Comparison of activated carbon and bottom ash for removal of reactive dye from aqueous solution. *Bioresource Technology*, 98(4), 834–839. doi: 10.1016/J.BIORTECH.2006.03.009
- [27] Malakootian, M., Faraji, M., Malakootian, M., & Nozari, M. (2021). Ciprofloxacin removal from aqueous media by adsorption process: a systematic review and meta-analysis. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 229, 252–282. doi: 10.5004/dwt.2021.27334

© Залевська І. В., Гурець Л. Л.

Дата надходження статті до редакції: 23.02.2024

Дата затвердження статті до друку: 06.03.2024