

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

МАГНІТНА МОДИФІКАЦІЯ ІОНООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

Д. Є. Ковтун¹, С. С. Душкін¹¹Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

УДК 628.167:661.183.2

DOI: 10.52363/2522-1892.2024.1.8

Отримано: 13 березня 2024

Прийнято: 24 квітня 2024

Cite as: Kovtun D., Dushkin S. (2024). Magnetic modification of ion exchange processes. Technogenic and ecological safety, 15(1/2024), 75–79. doi: 10.52363/2522-1892.2024.1.8

Анотація

Метод іонного обміну знайшов широке застосування в сучасних системах водопостачання. Іонообмінні установки застосовуються під час корекції мінерального складу води, до необхідних норм; очистки стічних вод; знесоленні та пом'якшенні природних вод. На сьогоднішній день відомі технічні рішення покращення протікання процесу очистки, пом'якшення та демінералізації води. Вони включають у себе: покращення фізико-хімічних умов; інтенсифікація протікання процесу іонного обміну; використання нових іонообмінних матеріалів; модифікація іонообмінних смол; комбінування з іншими методами обробки води; модернізація обладнання, конструкцій іонообмінних апаратів. В роботі досліджується вплив магнітної модифікації на інтенсифікацію процесів іонного обміну під час коригування мінерального складу природних вод. Отримані результати демонструють вплив магнітного поля на протікання процесу іонного обміну.

Ключові слова: іонний обмін, магнітна модифікація, інтенсифікація, природні води, корекція мінерального складу, очистка, пом'якшення, демінералізація.

1 Постановка проблеми

Сучасні підходи очистки води в системах водопідготовки включають в себе використання фізичних, хімічних та фізико-хімічних методів. Найпоширеніші проблеми які виникають, пов'язані з утворенням додаткового навантаження на навколишнє середовище при використанні хімічних реагентів а також низькою продуктивністю. Популярним методом очистки води є використання іонного обміну. Покращення умов протікання якого є перспективним напрямом екологізації процесу водопідготовки.

Використання іонного обміну під час коригування мінерального складу природних вод, до визначених потреб, є раціональним з точки зору економічного і технічного забезпечення. Іонний обмін полягає у стехіометричному обміні іонів між іонообмінним матеріалом та мінералізованою водою. Перевагою є можливість модифікації іонообмінних смол, для селективного вилучення іонів важких металів, від яких потребується очистка води.

При роботі іонообмінних установок важливим є врахування інтенсивності протікання процесу при коригуванні мінерального складу природних вод. До найбільш відомих методів інтенсифікації іонного обміну, які направлені на покращення фізико-хімічних умов процесу іонного обміну відносять наступні:

- використання ультразвуку – за рахунок явища кавітації при попередній обробці води, руйнуються наявні клітини мікроорганізмів а також крупно дисперсні частинки;
- хімічні каталізатори та активатори – при внесенні реагентів, утворюються сполуки які затримуються іонообмінними матеріалами, а також

модифікація природних іонів, для селективного видалення іонів присутніх у воді;

- електродеіонізація – принцип роботи полягає у винесенні до електродів, вилучених іонообмінними смолами іонів та у процесі регенерації іонообмінних матеріалів, при зміні полярності катоду і аноду.

- використання магнітного поля – полягає у певній зміні структури та фізичних властивостей водно-дисперсної системи та іонообмінного матеріалу.

Розглядається інтенсифікація іонного обміну методом магнітної модифікації, при демінералізації природних вод, як перспективний шлях до екологізації процесу вилучення іонів важких металів.

2 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вплив магнітного поля на фізичні властивості води, що піддається обробці розглядався у багатьох дослідженнях. Експериментально встановлено, залежність змін фізико-хімічних властивостей води від обробки магнітним полем. Основний вплив магнітної обробки полягає у прискореній адсорбції, зміні розчинності солей, гідратації іонів, зміні рН та швидкості протікання хімічних реакцій. [1–3]

В дослідженнях зазначаються приблизні оптимальні параметри обробки води магнітним полем. При проходженні води магнітного поля інтенсивністю 0,8 Тесла збільшується лужність води, що запобігає утворенню сульфатів та кристалів кальцію. Експериментально продемонстровано зміну концентрації іонів у складі оброблюваної води. Відбувалось збільшення іонів Na^+ та Cl^- та зменшення Mg^{2+} , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , що

пояснюється зміною гідратаційної оболонки навколо певних іонів [4, 5].

Проводились дослідження впливу магнітного поля на властивості води. Було продемонстровано коливання значення рН. Також відзначається, що швидкість потоку і температура води мають значний вплив на магнітну обробку, особливо на зміну рН після проходження через магнітні пристрої [6, 7].

Проведені дослідження впливу магнітної обробки на свердловинну воду демонструють незначну зміну рН – до 9 % при використанні електромагнітного поля напругою у 0,09 Тесла та зміну рН – до 24 % при використанні подвійного магнітного поля. Концентрація NaCl при обробці електромагнітним полем зменшувалась, при подвійному магнітному полі – збільшувалась [8].

Вплив магнітної обробки на адсорбційні матеріали, при водоочищенні, було досліджено на адсорбцію барвника на графітовому вуглі, використовуючи електричні струми для генерування різної напруженості магнітного поля.

Проводилось вилучення барвників з води на графітовому вуглі під впливом магнітного поля. Результати свідчать, що барвники з катіонними властивостями краще адсорбуються, через збільшення частоти зіткнень між молекулами барвника і поверхнею адсорбенту. В той же час, аніонні барвники починають гірше адсорбуватись, припущено, що це пов'язано з набуття адсорбенту негативного заряду при подачі струму [9].

При обробці електромагнітним полем бентоніту, спостерігалось утворення нових центрів адсорбції, що покращувало процес вилучення іонів міді [10]. Також зазначається покращення сорбції біогенних іонів на бентоніті обробленому електромагнітним полем. Що свідчить про можливі шляхи застосування магнітного поля, для комплексного очищення води у системах водопідготовки [11].

Дія сучасних магнітних апаратів пом'якшення води полягає у впливі магнітного поля на розчинені у воді гідратовані катіони металів, структуру гідратів і водних асоціатів, що призводить до зміни швидкості електрохімічної коагуляції, шляхом стимуляції утворення центрів кристалізації [12].

Використання магнітної обробки при водоочищенні також знайшло застосування у процесі освітлення води.

Поширеним методом підвищення ефективності освітлення води є використання концентрованого розчину коагулянту сульфату алюмінію. Встановлено, що використання подібного підходу, забезпечує зниження витрат реагенту. Проте виникає необхідність підвищення екологічної безпеки при використанні коагулянту алюмінію [13].

У роботі Душкіна С.С. [14] досліджується процес активації розчинів коагулянту сульфату алюмінію. Результати свідчать про підвищення продуктивності фільтрів до 40 %, а також про зниження вмісту залишкового алюмінію майже в два рази.

Модифікація магнетитом для видалення з води іонів магнію. Магнетит є дієвим каталізатором окислення іонів заліза у воді, крім того даний

каталізатор, нанесений на сильнокислотний катіоніт забезпечує ефективне вилучення іонів марганцю з води було встановлено, що катіоніт КУ-2-8 модифікований магнетитом в Na^+ формі має сорбційну ємність вищу, в порівнянні з немодифікованим катіонітом, що свідчить про суттєвий вклад каталітичного окислення іонів Mn^{2+} на модифікованому катіоніті при вилученні марганцю з води [15].

3 Вклад основного матеріалу

Процес Інтенсифікації полягає у покращенні протікання іонообмінного процесу у системах водопідготовки.

Досягти необхідного ефекту впливом магнітного поля, на воду яка підлягає очистці на сорбуючих матеріалах можна наступними шляхами:

1. Підвищення селективності сорбентів. Модифікація сорбенту. Зміна функціональних груп – заміна або додавання функціональних груп на поверхню сорбенту може підвищити його селективність [16].

2. Оптимізація рН середовища. Регулювання рН води може впливати на заряд іонів та їхню здатність до зв'язування з сорбентом. Для покращення іонного обміну може бути важливим підтримувати оптимальне значення рН для конкретного сорбенту і типу іонів. Традиційно використовують кислоти, або луги. Що завдає економічних збитків, а також є додатковим навантаженням на оточуюче середовище [17].

Енергія електричного поля під час магнітної обробки буде впливати на швидкість протікання хімічних реакцій, зміні рН, обміні іонів. Магнітне поле впливає на осадження кристалів металів жорсткості. У дослідженнях Karkush M. O. та ін., зазначається, що магнітне поле гальмує ріст кристалічних частинок. Зі збільшенням напруженості магнітного поля, зменшується концентрація Ca і підвищується рівень рН за рахунок поглинання H^+ іонів і збільшенню OH^- [4, 6–8, 18].

Дослідження динаміки протікання іонообмінного процесу свідчать про збільшення тривалості фільтроциклу при обробці іонообмінних колонок дією магнітного поля [19].

Спираючись на інформацію з літературних джерел, процес іонного обміну має хімічну природу. Інтенсифікація протікання іонного обміну досягається шляхом використання, як хімічних так і фізичних методів. Використання магнітного поля не змінює хімічний склад води, проте збільшує швидкість протікання хімічних реакцій [20].

Магнітне поле може впливати на рух частинок у розчині через магнітно-індуковану дифузію. Це може поліпшувати переміщення іонів та забруднень вздовж градієнта магнітної індукції, що може полегшити їхню взаємодію з іонно-обмінними матеріалами. При взаємодії з зарядженими частинками, як іони, магнітне поле впливає на їхню траєкторію та розподіл у системі, що може впливати на ефективність іонного обміну. Також у системах іонного обміну, де потрібна регенерація іонних

матеріалів, магнітне поле може використовуватися для підтримки або поліпшення процесу регенерації.

Впорядкування руху заряджених частинок, при використанні електромагнітного пояснюється таким явищем, як магнітно-індукована дифузія. Описується воно рівнянням сили Лоуренса, що визначає силу, що діє на магнітну частинку зі сторони електромагнітного поля:

$$F=q(E+v \cdot B), \quad (1)$$

де q – заряд частинки; E – напруженість електричного поля, (векторна величина); v – швидкість частинки (векторна величина); B – модуль вектора магнітного поля.

Виходячи з цього рівняння, можна зробити висновок, що для досягнення підвищення впливу магнітного поля на іони важких металів у воді, доцільним є підвищення напруженості електричного поля.

У іонів важких металів може виникати магнітне поле через внутрішній магнітний момент, який зазвичай походить від неспарених електронів у валентних атомних оболонках або від спіно-орбітальної взаємодії.

Заряджені частинки мають магнітний момент, що виникає внаслідок обертання частинки або наявності спіну.

Отже можемо виразити силу магнітного поля яка діє на іон, як:

$$F=\nabla(m \cdot B) \quad (2)$$

де ∇ позначає оператор градієнту, що діє на скалярний добуток магнітного моменту і магнітного поля; qE відповідає градієнту скалярного добутку $m \cdot B$. Швидкість руху частинки не враховується, тому що вираз описує силу, що діє на магнітний момент внаслідок зміни магнітного поля в просторі.

З обох виразів бачимо залежність від модулю вектора магнітного поля, що може бути використано, при регенерації іонообмінних матеріалів, після їх перенасичення.

Висновки

Проаналізовано технологію інтенсифікації процесів іонного обміну при водопідготовці. Визначено перспективність використання магнітної обробки іонообмінних матеріалів, а також вплив магнітного поля на воду, яка підлягає обробці.

Висунуто обґрунтування, впливу магнітного поля на елементи іонообмінного процесу.

Застосування (1) є доцільним при використанні технологій з постійним магнітним полем, крізь яке буде проходити вода, яка підлягає очистці від іонів важких металів, (2) підходить, для описання процесу впливу електромагнітного поля на статичні елементи системи водоочищення: безпосередньо на модифіковані магнетитом, чи не модифіковані іонообмінні матеріали.

Доцільним є використання комплексної системи інтенсифікації іонообмінного процесу, шляхом магнітної модифікації. Оброблені магнітним полем іонообмінні матеріали, будуть інтенсивніше поглинати іони важких металів, від яких необхідно очистити воду, тим самим обмінна ємність катіонітів буде використовуватись раціональніше. Після перенасичення іонообмінних матеріалів, процес їх регенерації буде супроводжуватись обробкою магнітним полем, що дає змогу знизити використання реагентів.

Слід зазначити, що вивчення механізму магнітної активації процесу іонного обміну, для досягнення кращих показників екологічної безпеки процесу очистки води в системах водопідготовки потребує проведення додаткових досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Savchenko V., Sinyavsky O., Bunko V. Influence of magnetic field on water. *Energy and automation*. 2019. T. 2019, № 1. С. 6-15. DOI: 10.31548/energiya2019.01.006.
2. Electron generation in water induced by magnetic effect and its impact on dissolved oxygen concentration / A. C. W. Yap, H. S. Lee, J. L. Loo, N. S. Mohd. *Sustainable Environment Research*. 2021. Vol. 21. Issue 1. Pp. 1-10. DOI: 10.1186/s42834-021-00080-0.
3. Smith J. The Magnetic Field Effects on Water and Its Magnetization. *Water*. 2014. Pp. 203-324. DOI: 10.1142/9789814440431_0003.
4. Jawad S. I., Karkush M. O., Kaliakin V. N. Alteration of physicochemical properties of tap water passing through different intensities of magnetic field. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2023. Vol. 32, no. 1. DOI: 10.1515/jmbm-2022-0246.
5. Zeron I. M., Abascal J. L. F., Vega C. A force field of Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , and SO_4^{2-} in aqueous solution based on the TIP4P/2005 water model and scaled charges for the ions. *The Journal of Chemical Physics*. 2019. Vol. 151. Issue 13. Art. 134504. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5121392>.
6. Amor H., Elaoud A., Hozayn M. Does Magnetic Field Change Water pH? *Asian Research Journal of Agriculture*. 2018. Vol. 8, no. 1. Pp. 1-7. DOI: 10.9734/arja/2018/39196.
7. Wu T., Brant J. A. Magnetic Field Effects on pH and Electrical Conductivity: Implications for Water and Wastewater Treatment. 2020. November. Pp. 717-727. DOI: 10.1089/ees.2020.0182.
8. Khalifa Boufa N. Investigation of the Effect of Magnetic Field on some Physical Properties of Water. *International Science and Technology Journal*. 2021. No. 26. P. 18.
9. What is the Effect of a Magnetic Field on Dye Adsorption onto Graphite Carbon? / N. Attan, D. P. Ramadhani, A. Munadhiroh, H. Nur. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2023. Vol. 19, no. 6. Pp. 1190-1202. DOI: 10.11113/mjfas.v19n6.3243
10. Kuntsur A., Sysa L., Petrova M. Investigation of copper adsorption on natural and microwave-treated bentonite. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6, no. 6 (90). Pp. 26–32. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.116090.
11. Концур А. 3., Сиса Л. В. Сорбція біогенних аніонів на бентоніті, стимульованому надвисокочастотним електромагнітним випромінюванням. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2018. № 13. С. 87-92.

12. Божедай П., Тютко С. М. Сучасні методи обробки води. *Статті та тези – Фаховий коледж*. Фаховий коледж Національного фармацевтичного університету. URL: <https://college.nuph.edu.ua/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96-%D1%82%D0%B0-%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8-2/>.
13. Dushkin S., Martynov S., Dushkin S. The increasing efficiency of upflow clarifiers at the drinking water preparation. *Acta Periodica Technologica*. 2020. Vol. 50. Pp. 17-27. DOI: 10.2298/APT2051017D.
14. Dushkin S. Study of the process of activation of aluminum sulfate coagulant solutions during filtration on rapid filters. *International Journal of Chemistry, Mathematics and Physics*. 2023. Vol. 7, no. 6. Pp. 01-06. DOI: 10.22161/ijcmp.7.6.1.
15. Гомеля М. Д., Трус І. М., Твердохліб М. М. Застосування модифікованого магнетитом катіоніту КУ-2-8 для деманганції підземних вод. *Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції, 25-26 листопада 2021 р., м. Київ. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 113-116. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46887>.
16. Córdova X., Valverde Flores J. Application of the bipolar electro dialysis technique for the production of hydrochloric acid from wastewater regeneration of ion exchange resins. *Journal of Sciences and Engineering*, 1(1). 2017. Pp. 1-11.
17. Kovtun D., Dushkin S. Analysis of existing methods for improving the physical and chemical conditions of the ion exchange process in water treatment. *Technogenic and Ecological Safety*. 2023. No. 14(2/2023). Pp. 92-97. DOI:10.52363/2522-1892.2023.2.9.
18. Karkush M. O., Ahmed M. D., Al-Ani S. M. A. Magnetic Field Influence on The Properties of Water Treated by Reverse Osmosis. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2019. Vol. 9, no. 4. Pp. 44334439. DOI: 10.48084/etasr.2855.
19. Душкін С. С. Дослідження динаміки процесів іонного обміну під час водовідготовки. *Матер. міжнар. наук.-техн. конф. "Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні" 6-7 грудня 2023 р.* Одеса: 2023. С. 101-102. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19007>.
20. Lupa L., Cochechi L. Heavy Metals Removal from Water and Wastewater. *Heavy Metals – Recent Advances*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.110228.

Kovtun D., Dushkin S.

MAGNETIC MODIFICATION OF ION EXCHANGE PROCESSES

The method of ion exchange is widely used in modern water supply systems. Ion exchange units are used to correct the mineral composition of water to the required standards; wastewater treatment; desalination and softening of natural waters. Today, there are technical solutions to improve the process of water purification, softening and demineralization. They include: improvement of physical and chemical conditions; intensification of the ion exchange process; use of new ion exchange materials; modification of ion exchange resins; combination with other water treatment methods; modernization of equipment and designs of ion exchange devices. The paper investigates the effect of magnetic modification on the intensification of ion exchange processes during the adjustment of the mineral composition of natural waters. The obtained results demonstrate the influence of the magnetic field on the ion exchange process.

Key words: ion exchange, magnetic modification, intensification, natural waters, mineral composition correction, purification, softening, demineralization.

REFERENCES

1. Savchenko, V., Sinyavsky, O., & Bunko, V. (2019). Influence of magnetic field on water. *Energy and automation*, 2019(1), 6-15. DOI: 10.31548/energiya2019.01.006.
2. Yap, A. C. W., Lee, H. S., Loo, J. L., & Mohd, N. S. (2021). Electron generation in water induced by magnetic effect and its impact on dissolved oxygen concentration. *Sustainable Environment Research*, 21(1), 1-10. DOI: 10.1186/s42834-021-00080-0.
3. Smith, J. (2014). The Magnetic Field Effects on Water and Its Magnetization. *Water*, 203-324. DOI: 10.1142/9789814440431_0003.
4. Jawad, S. I., Karkush, M. O., & Kaliakin, V. N. (2023). Alteration of physicochemical properties of tap water passing through different intensities of magnetic field. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32(1). DOI: 10.1515/jmbm-2022-0246.
5. Zeron, I. M., Abascal, J. L. F., & Vega, C. (2019). A force field of Li⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, and SO₄²⁻ in aqueous solution based on the TIP4P/2005 water model and scaled charges for the ions. *The Journal of Chemical Physics*, 151(13), 134504. DOI: 10.1063/1.5121392.
6. Amor, H., Elaoud, A., & Hozayn, M. (2018). Does Magnetic Field Change Water pH? *Asian Research Journal of Agriculture*, 8(1), 1-7. DOI: 10.9734/arja/2018/39196.
7. Wu, T., & Brant, J. A. (2020). Magnetic Field Effects on pH and Electrical Conductivity: Implications for Water and Wastewater Treatment. *Environmental Engineering Science*, 717-727. 10.1089/ees.2020.0182.
8. Boufa, N. K. (2021). Investigation of the Effect of Magnetic Field on some Physical Properties of Water. *International Science and Technology Journal*, 26, 18.
9. Attan, N., Ramadhani, D. P., Munadhiroh, A., & Nur, H. (2023). What is the Effect of a Magnetic Field on Dye Adsorption onto Graphite Carbon? *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 19(6), 1190-1202. DOI: 10.11113/mjfas.v19n6.3243.
10. Kontsur, A., Sysa, L., & Petrova, M. (2017). Investigation of copper adsorption on natural and microwave-treated bentonite. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(6 (90)), 26-32. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.116090.
11. Kontsur, A. Z., & Sysa, L. V. (2018). Sorbcija biogenykh anioniv na bentoniti, stymul'ovanomu nadvysokochastotnym elektromagnitnym vyprominjuvannjam [Sorbtion of biogenic anions on bentonite stimulated by ultrahigh-frequency electromagnetic radiation]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttyediyalnosti*, 13, 87-92. [in Ukrainian]
12. Bozhedai, P., & Tyutko, S. M. Suchasni metody obrobky vody [Modern methods of water treatment]. *Articles and theses - Professional College*. Professional College of the National University of Pharmacy. URL: <https://college.nuph.edu.ua/%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96-%D1%82%D0%B0-%D1%82%D0%B5%D0%B7%D0%B8-2/>. [in Ukrainian]
13. Dushkin, S., Martynov, S., & Dushkin, S. (2020). The increasing efficiency of upflow clarifiers at the drinking water preparation. *Acta Periodica Technologica*, 50, 17-27. DOI: 10.2298/APT2051017D.
14. Dushkin, S. (2023). Study of the process of activation of aluminum sulfate coagulant solutions during filtration on rapid filters. *International Journal of Chemistry, Mathematics and Physics*, 7(6), 01-06. DOI: 10.22161/ijcmp.7.6.1.
15. Gomelia, M. D., Trus, I. M., & Tverdokhib, M. M. (2021). Zastosuvannja modyfikovanogo magnetytom kationitu KU-2-8 dlja demanganacii' pidzemnyh vod [Application of magnetite-modified cationite KU-2-8 for demanganisation of groundwater]. *Chysta voda. Fundamental, applied and industrial aspects* : materials of the VII International Scientific and Practical Conference, 25-26 November 2021, Kyiiv. Kyiiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/46887>. [in Ukrainian]
16. Córdova, X., & Valverde Flores, J. (2017). Application of the bipolar electro dialysis technique for the production of hydrochloric acid from wastewater regeneration of ion exchange resins. *Journal of Sciences and Engineering*, 1(1), 1-11.

17. Kovtun, D., & Dushkin, S. (2023). Analysis of existing methods for improving the physical and chemical conditions of the ion exchange process in water treatment. *Technogenic and Ecological Safety*, 14(2/2023), 92-97. DOI: 10.52363/2522-1892.2023.2.9.
18. Karkush, M. O., Ahmed, M. D., & Al-Ani, S. M. A. (2019). Magnetic Field Influence on The Properties of Water Treated by Reverse Osmosis. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(4), 4433-4439. DOI: 10.48084/etasr.2855.
19. Dushkin, S. S. (2023). Study of the dynamics of ion exchange processes during water treatment. *Proceedings of the international scientific and technical conference "New and non-traditional technologies in resource and energy conservation" 6-7 December 2023*. Odesa, 101-102. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19007>. [in Ukrainian]
20. Lupa, L., & Coheci, L. (2023). Heavy Metals Removal from Water and Wastewater. *Heavy Metals – Recent Advances*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.110228>.