

АНОТАЦІЯ

Соседко А.О. Комплексне очищення стічних вод промислових виробництв з використанням наносорбентів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 – Архітектура та будівництво). – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженням з розробки комплексної технології очищення рідких гальванічних відходів лінії цинкування і утилізації відпрацьованих продуктів водоочищення як наповнювача в будівельних матеріалах. Це досягається шляхом покращання якості очищення промивних стічних вод, які містять іони Zn^{2+} з використанням залізовмісних сорбентів, одержаних з очищення відпрацьованих розчинів травлення сталі методом феритизації.

Стічні води гальванічного виробництва відносяться до найбільш небезпечних рідких відходів промислових підприємств. У зв'язку із різноманітням хімічного складу, властивостей і витрат стічних вод, необхідно передбачати на таких підприємствах використання спеціальних методів, а також споруд з попередньою та повним очищенням цих вод від різних забруднювачів. Найбільший об'єм виробництва гальванопокриттів припадає на лінію цинкування, а саме 40 ÷ 50 %. В результаті із недостатньо очищеними гальванічними стічними водами в водні об'єкти щороку потрапляють тисячі тон високотоксичних важких металів, зокрема іонів цинку, що значно ускладнюють екологічну ситуацію в країні.

Одним із способів вирішення екологічних проблем є широке впровадження безвідходних методів, зокрема, які ґрунтуються на повторному використанні очищених концентрованих і промивних вод. Окрім цього, актуальним є питання запобігання безповоротній втраті цінних важких металів та повернення їх у виробництво у вигляді товарної продукції.

Тому на часі всебічне дослідження економічно ефективного очищення гальванічних відходів, що забезпечує необхідний ефект очищення води від іонів важких металів та безпечну утилізацію відходів.

У першому розділі проведено аналіз стану питання поводження з рідкими відходами гальванічних виробництв, які містять токсичні сполуки іонів важких металів, зокрема цинку. Розглянуто основні види, склад та методи очищення стічних вод гальванічних виробництв, що утворюються при проведенні технологічних процесів, зв'язаних з промивкою деталей при їх обробці технологічними розчинами та нанесенні гальванічних покриттів. Показано, що в зв'язку з шкідливою дією на навколишнє середовище особливо сполук цинку та інших важких металів, до екологічної безпеки гальванічних виробництв ставляться підвищені вимоги.

Здійснено, теоретичний огляд очищення промивних стічних вод від сполук цинку сорбційними методами. Перспективним напрямком досліджень є використання магнітних сорбентів для вилучення забруднювачів з промислових стічних вод. У зв'язку з цим на виробництвах актуальною проблемою є не лише переробка технологічних розчинів, але також очищення промивних вод з метою вилучення з них іонів металу, утилізацію самого металу, повернення очищеної води у виробництво та запобігання забрудненню навколишнього природного середовища.

У другому розділі наведені методики отримання магнітних сорбційних матеріалів з осадів очищення відпрацьованих сірчаноокислих розчинів травлення сталі феритизаційним методом та відходів металообробки сталевих виробів методом електроерозійного диспергування. Представлено об'єкти дослідження, що включають в себе вид та склад стічних вод. У розділі описано методики проведення сорбційного очищення стічних вод при різних їх умовах процесу. Крім того, викладено фізико-хімічні методи дослідження отриманих сорбційних матеріалів і кількісного аналізу вимірювання вмісту іонів важких металів у розчинах спектрофотометричним методом. Приведено перелік приладів, котрі використовувалися в процесі досліджень.

Третій розділ роботи присвячено дослідженню феритизаційного очищення відпрацьованих розчинів травлення сталевих виробів, які містять іони Fe^{2+} , з метою отримання залізовмісних осадів, що при подальшій обробці застосовуються як сорбційні матеріали. В роботі виконано дослідження щодо удосконалення процесу феритизації, шляхом визначення найкращої швидкості аерації реакційної суміші киснем повітря при різних способах активації реакційної суміші. Як показали результати експериментів, що спосіб активації реакційної суміші і швидкість аерації киснем повітря впливає на ефективність вилучення іонів заліза з розчину та структуру осаду. Найкращі результати вилучення іонів заліза спостерігаються при швидкості аерації $0,06 \text{ дм}^3/\text{с}$ та тривалості процесу в 75 хв з термічною активацією реакційної суміші. При цьому залишкові концентрації $Fe^{заг.}$ в розчині після феритизації сягає значення в $0,08 \text{ мг}/\text{дм}^3$ з ступенем очищення $99,99 \%$. Очищена стічна вода при активації реакційної суміші феритизацією в $75 \text{ }^\circ\text{C}$, електромагнітною імпульсною та ультразвуковою відповідає вимогам гранично допустимих концентрацій іонів заліза для її повторного використання на гальванічному виробництві в промивних операціях та дозволяє скидання її в центральну каналізаційну мережу для подальшого очищення на загальноміських очисних спорудах.

Проведений якісний фазовий склад зразків феритизаційних осадів підтверджує наявність феромагнітних кристалічних фаз оксогідроксидів і оксидів заліза. Кількісний фазовий аналіз показав про вплив швидкості аерації і способу активації реакційної суміші на склад осадів. Результати досліджень також демонструють, що активація реакційної суміші ультразвуком в порівнянні з електромагнітною імпульсною активацією сповільнює процес трансформації фаз в осадах. Активація процесу феритизації при $75 \text{ }^\circ\text{C}$ призводить до отримання оксидної фази, щодо отримання максимального 100% вмісту хімічно стійкої оксидної фази Fe_3O_4 . Фазові дослідження добре корелюють даними хімічного аналізу очищеної стічної води. Як показали результати досліджень, фазові перетворення феритних сполук в осаді та їх стійкість в лужному середовищі впливають на вміст залишкових концентрацій

іонів заліза в розчині. Це підтверджується процесом трансформації нестійких проміжних фаз γ -FeOOH та δ -FeOOH у більш стійку Fe_3O_4 при різних способах активації феритизації.

Четвертий розділ роботи присвячений дослідженню очищенню промивних стічних вод, які містять іони цинку сорбційними методами. Здійснено порівняння ефективності вилучення іонів важких металів з стічної води різними типами сорбційних матеріалів, як мінерального походження, так і магнітних сорбентів отриманих в лабораторних умовах. Результати досліджень показали, що найефективніше себе проявив магнітний високодисперсний сорбент отриманий методом електроерозійного диспергування. Проте цей сорбент забруднює очищену воду іонами заліза до концентрацій $0,36 \text{ мг/дм}^3$, що пояснюється його фазовим складом. Для інших застосованих магнітних сорбентів вміст іонів заліза в очищеній воді були в межах $0,01 \div 0,04 \text{ мг/дм}^3$.

Для досягнення потрібної якості очищення стічних вод від іонів цинку в подальшій роботі досліджували застосування сорбентів осадів феритизації різного фазового складу від оксогідрооксидів до оксидів заліза при різних умовах сорбції. Використання ультразвуку в процесі сорбції іонів цинку порівняно з механічним перемішуванням в 800 об/хв підвищує їх вилучення з розчину в середньому на 10% . Але така обробка розчину, який має рН $5,6$, не досягається якість очищеної води, згідно вимогам ГДК щодо вмісту іонів цинку для повторного її використання на гальванічному виробництві. Зі збільшенням величини рН стічної води з $5,6$ до $8,0$ зростає ступінь вилучення іонів цинку. Серед досліджених зразків найкращу сорбційну здатність має зразок, фазовий склад якого $61,3 \%$ δ -FeOOH та $38,7 \%$ Fe_3O_4 . Застосуванні цього сорбенту зменшує концентрацію іонів цинку в до $2,4 \text{ мг/дм}^3$, ступінь очищення розчину $92,0 \%$, що не відповідає вказаним вище вимогам ГДК. Дослідження були зосереджені на вивченні сорбційної здатності зразка, який містить фазу магнетиту, так як процес отримання його є надійним та стабільним. Найбільша сорбційна здатність магнетитом досягнута при

величині рН 10 та використанні ультразвуку. При цьому концентрація іонів цинку в очищеному розчині сягає $0,31 \text{ мг/дм}^3$ із ступенем очищення цинквмісного розчину 98,9 %. Очищена таким чином вода відповідає вимогам щодо її повторного використання на гальванічному виробництві в промивних операціях та скиду в центральну каналізаційну мережу для подальшого очищення на загальноміських очисних спорудах.

В цьому розділі також проведені структурні дослідження відпрацьованих сорбентів на основі магнетиту. Результати електронної мікроскопії засвідчили входження іонів цинку в структуру сорбенту у вигляді фериту цинку та магнетиту. Це підтверджується також даними рентгенфлуоресцентної спектроскопії, що показали майже в двічі більший вміст іонів цинку в зразках відпрацьованих сорбентів отриманих при дії ультразвуку порівняно з зразком отриманим шляхом механічного перемішування.

У п'ятому розділі роботи показана можливість подальшої утилізації відпрацьованих сорбентів, як частину наповнювача в складі порошкових лакорфарбових матеріалах. Результати проведених досліджень показали, що використання відпрацьованих сорбентів в цілому сприяють підвищенню корозійної стійкості покриття з екрануючим захистом від електромагнітного випромінювання хвиль. Корозійна стійкість покриття відповідає класу С4 (високий) при забезпеченні середнього класу довговічності (М) від 7-ми до 15-ти років.

За результатами всіх досліджень розроблена комплексна технологія очищення гальванічних стічних вод лінії цинкування, яка забезпечила в порівнянні із традиційною: повернення до 80 % очищеної води в систему оборотного водопостачання підприємства; зменшення негативного впливу на навколишнє середовище в результаті високого ступеня вилучення іонів заліза та цинку з токсичних відходів; отримання екологічно безпечних продуктів їх очищення прийнятних до утилізації; можливість вирішення проблеми одночасного очищення висококонцентрованих і промивних стічних вод, від сполук важких металів; невисока собівартість очищення; енергоефективність

та ресурсоощадність процесу; здійснення автоматичного регулювання процесу.

Робота безпосередньо пов'язана з планами тематики Київського національного університету будівництва і архітектури, яка виконується на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ держреєстрації 0123U101948 «Створення технології комплексної переробки залізовмісних стічних вод з утилізацією відходів в екрануючих покриттях для військових об'єктів»). Отримані результати наукової роботи було впроваджено в робочий проект ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ЛАКОВЕР» м. Київ.

Ключові слова: гальванічні відходи, травильні розчини, промивні стічні води, важки метали, магнітні сорбенти, магнетит, феритизація, ультразвук, утилізація, порошкові фарби.

ANNOTATION

Sosedko A.O. Complex treatment of industrial wastewater using nanosorbents.
– Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 "Construction and civil engineering" (19 - Architecture and construction). - Kyiv National University of Construction and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation work is devoted to research on the development of a comprehensive technology for the purification of liquid galvanic waste from the galvanizing line and the utilization of waste water treatment products as a filler in building materials. This is achieved by improving the quality of the purification of washing wastewater containing Zn^{2+} ions using iron-containing sorbents obtained from the purification of spent steel pickling solutions by the ferritization method.

Wastewater from electroplating production is one of the most dangerous liquid wastes of industrial enterprises. Due to the diversity of the chemical composition, properties and flow rates of wastewater, it is necessary to provide for the use of special methods at such enterprises, as well as facilities with preliminary and

complete purification of this water from various pollutants. The largest volume of electroplating production falls on the galvanizing line, namely $40 \div 50\%$. As a result, thousands of tons of highly toxic heavy metals, in particular zinc ions, enter water bodies every year with insufficiently purified electroplating wastewater, which significantly complicates the environmental situation in the country.

One of the ways to solve environmental problems is the widespread implementation of waste-free methods, in particular, those based on the reuse of purified concentrated and washing waters. In addition, the issue of preventing the irreversible loss of valuable heavy metals and their return to production in the form of marketable products is relevant.

Therefore, a comprehensive study of cost-effective treatment of galvanic waste is needed, which provides the necessary effect of water purification from heavy metal ions and safe disposal of waste.

The first section analyzes the state of the issue of handling liquid waste from galvanic production, which contains toxic compounds of heavy metal ions, in particular zinc. The main types, composition and methods of treating wastewater from galvanic production, which are formed during technological processes associated with washing parts during their treatment with technological solutions and application of galvanic coatings, are considered. It is shown that due to the harmful effect on the environment, especially of zinc compounds and other heavy metals, increased requirements are placed on the environmental safety of galvanic production.

A theoretical review of the treatment of washing wastewater from zinc compounds by sorption methods is carried out. A promising area of research is the use of magnetic sorbents for the removal of pollutants from industrial wastewater. In this regard, the urgent problem in production is not only the processing of technological solutions, but also the purification of washing waters in order to extract metal ions from them, the utilization of the metal itself, the return of purified water to production and the prevention of environmental pollution.

The second section presents methods for obtaining magnetic sorption materials

from the sediments of the purification of spent sulfuric acid solutions for steel pickling by the ferritization method and waste from metalworking of steel products by the method of electroerosion dispersion. The objects of research are presented, including the type and composition of wastewater. The section describes the methods for carrying out sorption treatment of wastewater under various process conditions. In addition, physicochemical methods for studying the obtained sorption materials and quantitative analysis of measuring the content of heavy metal ions in solutions by the spectrophotometric method are presented. A list of devices used in the research process is provided.

The third section of the work is devoted to the study of ferritization purification of spent solutions for pickling steel products containing Fe^{2+} ions in order to obtain iron-containing precipitates, which are used as sorption materials in further processing. The work has carried out research on improving the ferritization process by determining the best rate of aeration of the reaction mixture with air oxygen for different methods of activation of the reaction mixture. As the results of the experiments showed, the method of activation of the reaction mixture and the rate of aeration with air oxygen affect the efficiency of iron ion extraction from the solution and the structure of the precipitate. The best results of iron ion extraction are observed at an aeration rate of $0.06 \text{ dm}^3/\text{s}$ and a process duration of 75 min with thermal activation of the reaction mixture. At the same time, the residual concentration of Fe_{total} in the solution after ferritization reaches a value of 0.08 mg/dm^3 with a degree of purification of 99.99%. Purified wastewater upon activation of the reaction mixture by ferritization at $75 \text{ }^\circ\text{C}$, electromagnetic pulse and ultrasonic meets the requirements of maximum permissible concentrations of iron ions for its reuse in galvanic production in washing operations and allows its discharge into the central sewage network for further treatment at citywide treatment facilities.

The qualitative phase composition of samples of ferritization sediments confirms the presence of ferromagnetic crystalline phases of iron oxohydroxides and oxides. Quantitative phase analysis showed the influence of the aeration rate and the

method of activation of the reaction mixture on the composition of the sediments. The results of the studies also demonstrate that activation of the reaction mixture by ultrasound in comparison with electromagnetic pulse activation slows down the process of phase transformation in sediments. Activation of the ferritization process at 75 °C leads to the production of an oxide phase, with a maximum content of 100% of the chemically stable oxide phase Fe₃O₄. Phase studies correlate well with the data of chemical analysis of treated wastewater. As the results of the studies showed, the phase transformations of ferrite compounds in the sediment and their stability in an alkaline environment affect the content of residual concentrations of iron ions in the solution. This is confirmed by the process of transformation of unstable intermediate phases γ -FeOOH and δ -FeOOH into more stable Fe₃O₄ with different methods of ferritization activation.

The fourth section of the work is devoted to the study of the purification of washing wastewater containing zinc ions by sorption methods. The efficiency of extracting heavy metal ions from wastewater by different types of sorption materials, both of mineral origin and magnetic sorbents obtained in laboratory conditions, was compared. The results of the studies showed that the most effective was the magnetic highly dispersed sorbent obtained by the method of electroerosion dispersion. However, this sorbent contaminates the purified water with iron ions to concentrations of 0.36 mg/dm³, which is explained by its phase composition. For other applied magnetic sorbents, the content of iron ions in the purified water was within 0.01 ÷ 0.04 mg/dm³.

To achieve the desired quality of wastewater purification from zinc ions, in further work, the use of ferritization sediment sorbents of different phase composition from oxohydroxides to iron oxides under different sorption conditions was investigated. The use of ultrasound in the process of sorption of zinc ions compared to mechanical stirring at 800 rpm increases their extraction from the solution by an average of 10%. But such treatment of the solution, which has a pH of 5.6, does not achieve the quality of purified water, according to the requirements of the MPC regarding the content of zinc ions for its reuse in electroplating

production. With an increase in the pH of wastewater from 5.6 to 8.0, the degree of extraction of zinc ions increases. Among the studied samples, the best sorption capacity is the sample with a phase composition of 61.3% δ -FeOOH and 38.7% Fe₃O₄. The use of this sorbent reduces the concentration of zinc ions in up to 2.4 mg/dm³, the degree of purification of the solution is 92.0%, which does not meet the above-mentioned requirements of the MPC. The studies were focused on studying the sorption capacity of the sample containing the magnetite phase, since the process of obtaining it is reliable and stable. The highest sorption capacity of magnetite was achieved at a pH of 10 and the use of ultrasound. At the same time, the concentration of zinc ions in the purified solution reaches 0.31 mg/dm³ with a degree of purification of the zinc-containing solution of 98.9%. Purified in this way Thus, the water meets the requirements for its reuse in electroplating production in washing operations and discharge into the central sewage network for further treatment at citywide treatment facilities.

This section also includes structural studies of spent magnetite-based sorbents. The results of electron microscopy showed the inclusion of zinc ions in the structure of the sorbent in the form of zinc ferrite and magnetite. This is also confirmed by the data of X-ray fluorescence spectroscopy, which showed almost twice the content of zinc ions in samples of spent sorbents obtained under the action of ultrasound compared to the sample obtained by mechanical mixing.

The fifth section of the work shows the possibility of further utilization of spent sorbents as part of the filler in powder paint and varnish materials. The results of the conducted studies showed that the use of spent sorbents generally contributes to increasing the corrosion resistance of the coating with shielding protection against electromagnetic radiation waves. The corrosion resistance of the coating corresponds to class C4 (high) while ensuring the average durability class (M) from 7 to 15 years.

According to the results of all studies, a comprehensive technology for cleaning galvanic wastewater from the galvanizing line was developed, which, compared to the traditional one, ensured: return of up to 80% of the treated water to the

enterprise's circulating water supply system; reduction of the negative impact on the environment as a result of a high degree of removal of iron and zinc ions from toxic waste; obtaining environmentally safe products of their purification acceptable for disposal; the possibility of solving the problem of simultaneous purification of highly concentrated and washing wastewater from heavy metal compounds; low cost of purification; energy efficiency and resource efficiency of the process; implementation of automatic process control.

The work is directly related to the plans of the subject of the Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, which is being carried out by order of the Ministry of Education and Science of Ukraine (state registration number 0123U101948 "Creation of technology for complex processing of iron-containing wastewater with waste utilization in shielding coatings for military facilities"). The results of the scientific work were implemented in the working project of the LIMITED LIABILITY COMPANY "LAKOVER", Kyiv.

Keywords: galvanic waste, pickling solutions, washing wastewater, heavy metals, magnetic sorbents, magnetite, ferritization, ultrasound, recycling, powder paints.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. WHO/UNICEF Progress on Sanitation and Drinking-Water — Update 2013. Available online: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/81245> (accessed on 28 August 2022).
2. Jaspal D., Malviya A., Composites for Wastewater Purification: A Review. *Chemosphere*. 2020. № 246.125788.
3. Виноградов С.С. Промивні операції в гальванічному виробництві. Глобус. 2008. – 311 с.
4. European Environment Agency EEA Report No 23/2018 Industrial Waste Water Treatment Pressures on Environment. Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/industrial-waste-water-treatment-pressures> (accessed on 28 August 2022).
5. Ризо Е.Г. Расчет режимов водопотребления при промывке деталей в процессах гальванопокрытий и химобработки. Часть 1. Водопотребление промышленных предприятий. *Вода и экология*. 2000. №1. С.1 - 17.
6. Пляцук Л.Д., Мельник О. С. Аналіз технологій очищення гальванічних стоків в Україні. *Вісник СумДУ*. 2008. № 2. С. 51 – 56.
7. Ali I., Basheer A.A., Mbianda X.Y., Burakov A.,Grachev V., Graphene Based Adsorbents for Remediation of Noxious Pollutants from Wastewater. *Environ. Int.* 2019. №127. С. 160 – 180.
8. Coelho F. E., Oliveira V. S., Araújo E. M. R., Miranda T. L. S., Treatment of a wastewater from a galvanizing industry containing chromium(VI) and zinc(II) by liquid surfactant membranes technique. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2021. №56(3). С. 289 – 302.
9. Клименко М.О., Бедункова О.О. Кругообіг важких металів у водних екосистемах: монографія. Рівне: НУВГП. 2008. 216 с.
10. American Galvanizers Association (AGA). Protecting Steel for a Sustainable Future. <https://galvanizeit.org/about-aga>.
11. Ильин В.А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание. – Л.: Машиностроение. 1983. – 87 с.

12. Стічні води травильних відділень. Studfile. URL: <https://www.chem21.info/info/1627040/> (дата звернення 25.10.2021).

13. Комарова Л.Ф. Використання води на підприємствах та очистка стічних вод в різних ланках промисловості : навчальний посібник. Барнаул : АлтГТУ. 2010. 174 с.

14. Мельник Е.С. Оцінка екологічної небезпеки гальванічного виробництва (на прикладі ВАТ «Сумське МНВО імені Фрунзе». *Питання хімії та хімічної технології*. 2010. №1. С.183 – 188.

15. Донченко М.І., Фроленкова С.В. Екологічна безпека гальванотехніки. Ч. 1. Стічні води. Механічна та сорбційна очистка: навч. посіб. 2016. – 202 с.

16. Agarwal S. K. Heavy Metals Pollution. *APH Publishing Corporation*. 2009. – 270 с.

17. U.S. EPA. 2012. National analysis: The national biennial RCRA hazardous waste report (based on 2011 data). 2011. С. 448.

18. Держстат України, 1998-2020. Утворення та поводження з відходами I-IV класів небезпеки за категоріями матеріалів.

19. Demant V. Effiziente Edelmetall-Rückgewinnung aus zosungen mittels Electrolyse. *Galvanotechnik*. 1991. Vol.82, No.2. С.581 – 584.

20. Yang X. et al. Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: a critical review. *Chem. Eng. J.* 2019. №366. С. 608 – 621.

21. Patent 4422943 US, IPC C 02 F 1/52. Method for precipitation of heavy metal sulfides / R. G. Fender et al. No 380815, 27.12.1983.

22. Запольський А. К., Мішкова-Клименко Н. А., Астрелін І. М., Брик М. Т., Гвоздяк П.І., Князькова Т. В. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод. Підручник. – К.: Лібра. 2000. – 552 с.

23. Rahmati N. O., Pourafshari Chenar M. & Azizi Namaghi H. Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. *J. Ind. Eng. Chem.* 2019. № 76. С. 17 – 38.

24. Paulino A. T. et al. Novel adsorbent based on silkworm chrysalides for removal

of heavy metals from wastewaters. *J. Colloid Interface Sci.* 2006. № 301. C. 479 – 487.

24. Rahmati N. O., Pourafshari Chenar M. & Azizi Namaghi H. Removal of free active chlorine from synthetic wastewater by MEUF process using polyethersulfone/titania nanocomposite membrane. *Sep. Purif. Technol.* 2017. № 181. C. 213 – 222.

26. Huang J. et al. Repeating recovery and reuse of SDS micelles from MEUF retentate containing Cd^{2+} by acidification UF. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2017. № 520. C. 361 – 368.

27. Huda N., Nik B., Nik M., Mohamed S. & Aroua K. Removal of heavy metal ions from mixed solutions via polymer-enhanced ultrafiltration using starch as a water-soluble biopolymer. *Environ. Prog. Sustain. Energy.* 2015. № 34. C. 359 – 367.

28. Wang L. K., Chen J. P., Hung Y.-T. & Shamma N. K. Membrane and Desalination Technologies. *Membrane and Desalination Technologies.* 2011.vol. 13.

29. Jamil T. S., Mansor E. S., Abdallah H., Shaban A. M. & Souaya E. R. Novel anti fouling mixed matrix $\text{CeO}_2/\text{Ce}_7\text{O}_{12}$ nanofiltration membranes for heavy metal uptake. *J. Environ. Chem. Eng.* 2018. № 6. C. 3273 – 3282.

30. Ozaki H., Sharma K. & Saktaywin W. Performance of an ultra-low-pressure reverse osmosis membrane (ULPROM) for separating heavy metal: effects of interference parameters. *Desalination.* 20021.№ 44. C. 287 – 294.

31. Samaei S. M., Gato-Trinidad S. & Altaee A. Performance evaluation of reverse osmosis process in the post-treatment of mining wastewaters: Case study of Costerfield mining operations, Victoria, Australia. *J. Water Process Eng.* 2020. № 34. C.101 – 116.

32. He M. et al. Novel polydopamine/metal organic framework thin film nanocomposite forward osmosis membrane for salt rejection and heavy metal

removal. *Chem. Eng. J.* 2020. № 389, 124452.

33. Cui Y., Ge Q., Liu X.-Y. & Chung T.-S. Novel forward osmosis process to effectively remove heavy metal ions. *J. Memb. Sci.* 2014. № 467. C. 188 – 194.

34. Al-Amshawee S. et al. Electrodialysis desalination for water and wastewater: a review. *Chem. Eng. J.* 2020. № 380. 122231.

35. Min, K. J., Kim, J. H. & Park, K. Y. Characteristics of heavy metal separation and determination of limiting current density in a pilot-scale electrodialysis process for plating wastewater treatment. *Sci. Total Environ.* 2021. № 757. 143762.

36. Santos P. G., Scherer C. M., Fisch A. G. & Rodrigues M. A. S. Petrochemical wastewater treatment: water recovery using membrane distillation. *J. Clean. Prod.* 2020. № 267. 121985.

37. Qu D. et al. Experimental study of arsenic removal by direct contact membrane distillation. *J. Hazard. Mater.* 2009. № 163. C. 874 – 879.

38. Zaheri P., Mohammadi T., Abolghasemi H. & Ghannadi Maraghe M. Supported liquid membrane incorporated with carbon nanotubes for the extraction of Europium using. *Chem. Eng. Res. Des.* 2015. № 100, C. 81 – 88.

39. Jean E., Villemin D., Hlaibi M. & Lebrun L. Heavy metal ions extraction using new supported liquid membranes containing ionic liquid as carrier. *Sep. Purif. Technol.* 2018. № 201. C.1 – 9.

40. De Los Ríos, A. P. et al. On the selective separation of metal ions from hydrochloride aqueous solution by pertraction through supported ionic liquid membranes. *J. Memb. Sci.* 2013. № 444. C. 469 – 481.

41. Dąbrowski A., Hubicki Z., Podkościelny P. & Robens E. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method. *Chemosphere.* 2004. № 56. C. 91–106.

42. Kang S.-Y., Lee J.-U., Moon S.-H. & Kim K.-W. Competitive adsorption characteristics of Co^{2+} , Ni^{2+} , and Cr^{3+} by IRN-77 cation exchange resin in synthesized wastewater. *Chemosphere.* 2004. № 56. C.141 – 147.

43. Запольський А. К., Мішкова-Клименко Н. А., Астрелін І. М., Брик М.

Т., Гвоздяк П.І., Князькова Т. В. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод. Підручник. – К.: Лібра, 2000. – 552 с.

44. Плящук Л.Д., Мельник О.С. Аналіз технологій очищення гальванічних стоків в Україні. *Вісник СумДУ*. 2008. №2. С.116 - 121.

45. Mazumder, A., Chowdhury, Z., Sen, D. & Bhattacharjee, C. Electric field assisted membrane separation for oily wastewater with a novel and cost-effective electrocoagulation and electroflotation enhanced membrane module (ECEFM). *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 2020.151.

46. Moussa D. T., El-Naas M. H., Nasser M. & Al-Marri M. J. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: potentials and challenges. *J. Environ. Manag.* 2017. № 186, С. 24 – 41.

47. Зайцев Е.Д. Совершенствование метода гальванокоагуляции вредных примесей всточных водах промышленных предприятий. *Цветная металлургия*. 2000. №2. С. 45 - 51.

48. Василенко Л.О. Гальванокоагуляційне очищення промивних стічних вод, які містять хром. Автореферат дисертації на здобуття н.с. к.т.н., 2004, – К.: КНУБА.

49. Калюжный С.В. Методы очищення сточных вод: учебное пособие / под. ред. С.В. Калюжного. – М.: Мир, 2004. – 128 с.

50. Karnib M., Kabbani A., Holail H. & Olama Z. Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite. *Energy Procedia*. 2014. № 50. С. 113 – 120.

51. Krishna Kumar A. S., Jiang S. J. & Tseng W. L. Effective adsorption of chromium from aqueous solution using ionic liquid functionalized multiwalled carbon nanotubes as a super sorbent. *J. Mater. Chem.* 2015. A 3. С. 7044 – 7057.

52. Duan C., Ma T., Wang J. & Zhou Y. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: a review. *J. Water Process Eng.* 2020/ № 37. 101339.

53. Marciniak M., Goscianska J., Frankowski M. & Pietrzak R. Optimal synthesis of oxidized mesoporous carbons for the adsorption of heavy metal ions. *J. Mol. Liq.* 2019. № 276, C. 630 – 637.

54. Owalude S. O. & Tella A. C. Removal of hexavalent chromium from aqueous solutions by adsorption on modified groundnut hull. Beni-Suef Univ. *J. Basic Appl. Sci.* 2016. № 5, C. 377 – 388.

55. Ngah W. S. W. & Fatinathan S. Adsorption of Cu(II) ions in aqueous solution using chitosan beads, chitosan-GLA beads and chitosan-alginate beads. *Chem. Eng. J.* 2008. № 143, C. 62 – 72.

56. Upadhyay U., Sreedhar I., Singh S. A., Patel C. M. & Anitha K. L. Recent advances in heavy metal removal by chitosan based adsorbents. *Carbohydr. Polym.* 2021. № 251. 117000.

57. Vakili M. et al. Novel crosslinked chitosan for enhanced adsorption of hexavalent chromium in acidic solution. *Chem. Eng. J.* 2018. № 347. C. 782 –790.

58. Refaat Alawady A., Ali Alshahrani A., Ali Aouak T. & Mohamed Alandis N. Polysulfone membranes with CNTs/Chitosan biopolymer nanocomposite as selective layer for remarkable heavy metal ions rejection capacity. *Chem. Eng. J.* 2020. № 388. 124267.

59. Li Y., Li L. & Yu J. Applications of zeolites in sustainable. *Chem. Chem.* 2017. № 3. C. 928 – 949.

60. Liu L. et al. Preparation and characterization of chitosan/graphene oxide composites for the adsorption of Au(III) and Pd(II). *Talanta.* 2012. № 93. C. 350 – 357.

61. Zhang T. et al. Removal of heavy metals and dyes by clay-based adsorbents: from natural clays to 1D and 2D nano-composites. *Chem. Eng. J.* 2020.127574.

62. Alshameri A. et al. Understanding the role of natural clay minerals as effective adsorbents and alternative source of rare earth elements: adsorption operative parameters. *Hydrometallurgy.* 2019. № 185. C.149 – 161.

63. Hao S. et al. Optimal synthesis of amino-functionalized mesoporous silicas for the adsorption of heavy metal ions. *Microporous Mesoporous Mater.* 2016. № 236. С. 250 – 259.

64. Costa H. P. de S. da Silva M. G. C. & Vieira M. G. A. Biosorption of aluminum ions from aqueous solutions using non-conventional low-cost materials: a review. *J. Water Process Eng.* 2021. № 40. 101925.

65. Abdel Maksoud M. I. A. et al. Insight on water remediation application using magnetic nanomaterials and biosorbents. *Coord. Chem. Rev.* 2020. № 403, 213096.

66. Ai T., Jiang X., Liu Q., Lv L. & Wu H. Daptomycin adsorption on magnetic ultrafine wood-based biochars from water: kinetics, isotherms, and mechanism studies. *Bioresour. Technol.* 2019. № 273. С. 8 – 15.

67. Gupta V. K., Ali I., Saleh T. A., Siddiqui M. N. & Agarwal S. Chromium removal from water by activated carbon developed from waste rubber tires. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2013. № 20. С. 1261 – 1268.

68. Jamshidifard S. et al. Incorporation of UiO-66-NH₂ MOF into the PAN/chitosan nanofibers for adsorption and membrane filtration of Pb(II), Cd(II) and Cr(VI) ions from aqueous solutions. *J. Hazard. Mater.* 2019. № 368. С. 10 – 20.

69. Zhang Y. et al. Insight into the efficient co-removal of Cr(VI) and Cr(III) by positively charged UiO-66-NH₂ decorated ultrafiltration membrane. *Chem. Eng. J.* 2021. № 404. 126546.

70. Пат. № 102154 UA. Спосіб утилізації кислих залізовмісних розчинів. МКП С09С 1/22 / Василенко І. А., Куманьов С. О.; заявники та власники патенту Василенко І. А., Куманьов С. О. – № а201112825; заявл. 01.11.2011; опубл. 10.06.2013, Бюл. № 11. – 6с.

71. Другов Ю.С. Экологическая аналитическая химия, 2000. – 432 с.

72. Пат. № 99538 UA. Спосіб одержання чорного залізооксидного пігменту. МКП С09С 1/22, 1/24, 1/62, 3/06 / Василенко І. А., Чиванов В. Д., Бордунова О. Д.; заявники та власники патенту Василенко І. А., Чиванов В. Д.,

Бордунова О. Д. – № 201101341; заявл. 07.02.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16. – 8 с.

73. Пантелят Г.С., Ефремов А.Б. Очистка сточных вод гальванических и травильных отделений металлургических и машиностроительных заводов. *Науковий вісник будівництва* – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ. 2006. Вип. 35. С. 209 – 212.

74. Barrado E., Rieto F., Garay F.J. Characterization of nickel-bearing ferrites obtained as byproducts of hydrochemical wastewater purification processes. *In: Electrochimica Acta*. 2002. vol.47, is.22 – 23. С. 1959 – 1965.

75. Tua Yao-Jen, Chang Chien-Kuei, Youa Chen-Feng, Treatment of complex heavy metal wastewater using a multi-staged ferrite process. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. № 209 – 210. С. 379 – 384.

76. Пат. 2220110 Рос. Федерация. № 2001126115/15. Электроимпульсный способ очищения воды / Левченко Ю.В., Левченко В.Ф. заявл. 26.09.2001; опубл. 27.12.2003, Бюл. № 13. – с. 5.

77. Petcharoen K., Sirivat A. Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles via the chemical co-precipitation method. *Mater. Sci. Eng. B*. 2012. № 177. С. 421– 427.

78. Tu Y.-J., You C.F. , Chang C.K. , Chen M.H. Application of magnetic nano-particles for phosphorus removal/recovery in aqueous solution. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2015. № 4. С.148 –154.

79. Hou Y. , Yu J., Gao S. Solvothermal reduction synthesis and characterization of superparamagnetic magnetite nanoparticles. *J. Mater. Chem.* 2003. № 13. С. 1983 – 1987.

80. Zhao F., Zhang, B., Feng L. Preparation and magnetic properties of magnetite nanoparticles. *Mater. Lett.* 2012. № 68. С. 112 – 114.

81. Lakshmanan R., Okoli C., Boutonnet M., JäråsS. , Rajarao G.K. Microemulsion prepared magnetic nanoparticles for phosphate removal: Time efficient studies. *J. Environ. Chem. Eng.* 2014. №2. С. 185 – 189.

82. Es'haghzade Z., Pajootan E., Bahrami H., Arami M. Facile synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles via aqueous based electrochemical route for heterogeneous electro-Fenton removal of azo dyes. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2017. № 71. C. 91–105.

83. Miao F., Hua W., Hu L., Huang K. Magnetic Fe₃O₄ nanoparticles prepared by a facile and green microwave-assisted approach. *Mater. Lett.* 2011. № 65. C. 1031–1033.

84. Li Q., Yang F., Zhang J., Zhou C. Magnetic Fe₃O₄/MnO₂ core–shell nanocomposite for removal of heavy metals from wastewater. *SN Appl. Sci.* 2020. № 2. 1375.

85. Oliveira L.C.A., Petkowicz D.I., Smaniotto A., Pergher S.B.C. Magnetic zeolites: A new adsorbent for removal of metallic contaminants from water. *Water Res.* 2004. № 38. C. 3699 – 3704.

86. Jung K.-W., Choi B.H., Jeong T.-U., Ahn K.-H. Facile synthesis of magnetic biochar/Fe₃O₄ nanocomposites using electromagnetization technique and its application on the removal of acid orange 7 from aqueous media. *Bioresour. Technol.* 2016. № 220. C. 672 – 676.

87. Meral K., Metin Ö. Graphene oxide-magnetite nanocomposite as an efficient and magnetically separable adsorbent for methylene blue removal from aqueous solution. *Turk. J. Chem.* 2014. № 38. C. 775 – 782.

88. Li Y., Wu M., Zhang X. Synthesis of magnetic lignin-based hollow microspheres: A highly adsorptive and reusable adsorbent derived from renewable resources. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2016. № 4. C. 5523 – 5532.

89. Nata I.F., Wicakso D.R., Ramadhani D. Selective adsorption of Pb(II) ion on amine-rich functionalized rice husk magnetic nanoparticles biocomposites in aqueous solution. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020. № 8. 104339.

90. Charpentier T.V.J., Neville A.,Richardson T. Preparation of magnetic carboxymethylchitosan nanoparticles for adsorption of heavy metal ions. *ACS Omega.* 2016. № 1. C. 77 – 83.

91. Lee P.L., Sun Y.C., Ling Y.C. Magnetic nano-adsorbent integrated with lab-on-valve system for trace analysis of multiple heavy metals. *J. Anal. At. Spectrom.* 2009. № 24. C. 320 – 327.

92. Huang S., Xu, J., Ouyang G. Synthesis and application of magnetic molecularly imprinted polymers in sample preparation. *Anal. Bioanal. Chem.* 2018. № 410. C. 3991 – 4014.

93. Meteku B.E., Huang J., Yan Z. Magnetic metal-organic framework composites for environmental monitoring and remediation. *Coord. Chem. Rev.* 2020. № 413. 213261.

94. Minh P.T., Lebedeva O.E. Adsorption properties of a magnetite composite with coffee waste. *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2018. № 92. C. 2044 – 2047.

95. Донцова Т.А. Металоксидні наноматеріали і нанокompозити екологічного призначення : монографія / Т.А. Донцова. – Київ : «Політехніка». 2021. – 323 с.

96. Aredes S., Klein B., Pawlik M. The Removal of Arsenic from Water Using Natural Iron Oxide Minerals. *J. Clean. Prod.* 2012. № 29. C. 208 – 213.

97. Tang S.C.N., Lo I.M.C. Magnetic Nanoparticles: Essential Factors for Sustainable Environmental Applications. *Water Res.* 2013. № 47. C. 2613 –2632.

98. Tadic M., Trpkov D., Panjan M. Hydrothermal Synthesis of Hematite (α -Fe₂O₃) Nanoparticle Forms: Synthesis Conditions, Structure, Particle Shape Analysis, Cytotoxicity and Magnetic Properties. *J. Alloy. Compd.* 2019. № 792. C. 599 – 609.

99. Gurmen S., Ebin B. Production and Characterization of the Nanostructured Hollow Iron Oxide Spheres and Nanoparticles by Aerosol Route. *J. Alloy. Compd.* 2010. № 492. C. 585 – 589.

100. Zia M., Phull A.R., Ali J.S. Challenges of Iron Oxide Nanoparticles. *Powder Technol.* 2016. № 7. C. 49 – 67.

101. Wadhawan S., Jain A., Nayyar J., Mehta S.K. Role of Nanomaterials as Adsorbents in Heavy Metal Ion Removal from WasteWater: A Review. *J. Water Process Eng.* 2020. № 33. 101038.

102. Shaker M.A. Adsorption of Co (II), Ni (II) and Cu (II) Ions onto Chitosan-Modified Poly (Methacrylate) Nanoparticles: Dynamics, Equilibrium and Thermodynamics Studies. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2015. № 57. C. 111 – 122.

103. Ain Q.-U., Farooq M.U., Jalees M.I. Application of Magnetic Graphene Oxide for Water Purification: Heavy Metals Removal and Disinfection. *J. Water Process Eng.* 2020. № 33. 101044.

104. Song J., Kong H., Jang J. Adsorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solution by Polyrhodanine-Encapsulated Magnetic Nanoparticles. *J. Colloid Interface Sci.* 2011. № 359. C. 505 – 511.

105. Nassar N.N. Rapid Removal and Recovery of Pb (II) from Wastewater by Magnetic Nanoadsorbents. *J. Hazard. Mater.* 2010. № 184. C. 538 – 546.

106. Kalantari K., Ahmad M.B.,Khandanlou R. Rapid and High Capacity Adsorption of Heavy Metals by Fe₃O₄/Montmorillonite Nanocomposite Using Response Surface Methodology: Preparation, Characterization, Optimization, Equilibrium Isotherms, and Adsorption Kinetics Study. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2015. № 49. C. 192 – 198.

107. Pang Y., Zeng G., Xie G. PEI-Grafted Magnetic Porous Powder for Highly Effective Adsorption of Heavy Metal Ions. *Desalination.* 2011. № 281.C. 278 – 284.

108. Ge F., Li M.M., Ye H., Zhao B.X. Effective Removal of Heavy Metal Ions Cd²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺, Cu²⁺ from Aqueous Solution by Polymer-Modified Magnetic Nanoparticles. *J. Hazard. Mater.* 2012. № 211–212. C. 366 – 372.

109. Roy A., Bhattacharya J., Removal of Cu (II), Zn (II) and Pb (II) from Water Using Microwave-Assisted Synthesized Maghemite Nanotubes. *Chem. Eng. J.* 2012. № 211–212. C. 493 – 500.

110. Karami H. Heavy Metal Removal from Water by Magnetite Nanorods. *Chem. Eng. J.* 2013. № 219. C. 209 – 216.

111. Ren Y., Abbood H.A., He F., Peng H., Huang K. Magnetic EDTA-Modified Chitosan/SiO₂/Fe₃O₄ Adsorbent: Preparation, Characterization, and Application in Heavy Metal Adsorption. *Chem. Eng. J.* 2013. № 226. C. 300 – 311.

112. Xu Y., Zhou Y., Li R. Simultaneous Fluorescence Response and Adsorption of Functionalized Fe₃O₄@SiO₂ Nanoparticles to Cd²⁺, Zn²⁺ and Cu²⁺. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2014. № 459. C. 240 – 246.

113. Ahmadi A., Heidarzadeh S.,.....Harouni H.A. Optimization of Heavy Metal Removal from Aqueous Solutions by Maghemite (γ -Fe₂O₃) Nanoparticles Using Response Surface Methodology. *J. Geochem. Explor.* 2014. № 147. C.151 – 158.

114. Souda P., Sreejith L. Magnetic Hydrogel for Better Adsorption of Heavy Metals from Aqueous Solutions. *J. Environ. Chem. Eng.* 2015. № 3. C. 1882 – 1891.

115. Moradinasab S., Behzad M. Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution Using Fe₃O₄ Nanoparticles Coated with Schiff Base Ligand. *Desalin. Water Treat.* 2016. № 57. C. 4028 – 4036.

116. Bao S., Tang L., Liu Y. Highly Selective Removal of Zn (II) Ion from Hot-Dip Galvanizing Pickling Waste with Amino-Functionalized Fe₃O₄@SiO₂ Magnetic Nano-Adsorbent. *J. Colloid Interface Sci.* 2016. № 462. C. 235 – 242.

117. Habila M.A., Alothman Z.A.,Soylak M. Synthesis and Application of Fe₃O₄@SiO₂@TiO₂ for Photocatalytic Decomposition of Organic Matrix Simultaneously with Magnetic Solid Phase Extraction of Heavy Metals Prior to ICP-MS Analysis. *Talanta.* 2016. № 154.C. 539 – 547.

118. Zhao J., Liu J.,.....Cui F. Highly Efficient Removal of Bivalent Heavy Metals from Aqueous Systems by Magnetic Porous Fe₃O₄-MnO₂: Adsorption Behavior and Process Study. *Chem. Eng. J.* 2016. № 304. C. 737 – 746.

119. Guo S., Jiao P., Gao W. Synthesis of Magnetic Bioadsorbent for Adsorption of Zn (II), Cd (II) and Pb (II) Ions from Aqueous Solution. *Chem. Eng. Res. Des.* 2017. № 126. C. 217 – 231.

120. Jin S., Park B.C., Kim Y.K. Effect of the Magnetic Core Size of Amino-Functionalized Fe₃O₄-Mesoporous SiO₂ Core-Shell Nanoparticles on the

Removal of Heavy Metal Ions. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 2017. № 531. C. 133 – 140.

121. Ramutshatsha-Makhwedzha D., Ngila J.C., Ndungu P.G., Nomngongo P.N. Ultrasound Assisted Adsorptive Removal of Cr, Cu, Al, Ba, Zn, Ni, Mn, Co and Ti from Seawater Using Fe₂O₃-SiO₂-PAN Nanocomposite: Equilibrium Kinetics. *J. Mar. Sci. Eng.* 2019. № 7. 133.

122. Xu H., Yuan H., Yu J., Lin S. Study on the Competitive Adsorption and Correlational Mechanism for Heavy Metal Ions Using the Carboxylated Magnetic Iron Oxide Nanoparticles (MNPs-COOH) as Efficient Adsorbents. *Appl. Surf. Sci.* 2019. № 473. C. 960 – 966.

123. Asadi R., Abdollahi H., Gharabaghi M., Boroumand Z. Effective Removal of Zn (II) Ions from Aqueous Solution by the Magnetic MnFe₂O₄ and CoFe₂O₄ Spinel Ferrite Nanoparticles with Focuses on Synthesis, Characterization, Adsorption, and Desorption. *Adv. Powder Technol.* 2020. № 31. C. 1480 –1489.

124. Li G., Zhao Z., Liu J., Jiang G. Effective Heavy Metal Removal from Aqueous Systems by Thiol Functionalized Magnetic Mesoporous Silica. *J. Hazard. Mater.* 2011. № 192. C. 277 – 283.

125. Кочетов Г.М., Самченко Д.М. Удосконалення феритизаційної технології переробки стічних вод: електромагнітна імпульсна активація процесу. Водопостачання та водовідведення. 2015. Вип 3. С. 20 -26.

126. Samchenko D.M., Kochetov G.M., Derecha D.O., Skirta Y.B. Sustainable approach for galvanic waste processing by energy-saving ferritization with AC-magnetic field activation. *Cogent Engineering.* 2022. №9 (1), 2143072.

127. Kochetov G., Samchenko D., Lastivka O. Determining the rational parameters for processing spent etching solutions by ferritization using alternating magnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2022. №3 (10). C. 21 – 28.

128. Samchenko D., Kochetov G., Trach Y., Chernyshev D., Kravchuk A. Influence of Technological Factors on the Formation and Transformation of Iron-

Containing Phases in the Process of Ferritization of Exhausted Etching Solutions. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. Water (Switzerland). 2024, 16(8), 1085.

129. Halbedel B., Prikhna T., Monastyrov M. Iron oxide nanopowder synthesized by electroerosion dispersion (EED) - properties and potential for microwave applications. *Current Appl. Phys.*, 2018. № 11. С. 1410 – 1414.

130. Kochetov G., Prikhna T., D. Samchenko,Moshchil, A. Mamalis Resource-efficient ferritization treatment for concentrated wastewater from electroplating production with aftertreatment by nanosorbents. *Nanotechnology Perceptions*, 2021. № 17, С. 9 -18.

131. Justin J. M. On Generalized Variance Functions for Sample Means and Medians. *JSM 2018 – Survey Research Methods Section*, 2018. С. 584 – 594.

132. Roy A., Bhattacharya J. Removal of Cu (II), Zn (II) and Pb (II) from Water Using Microwave-Assisted Synthesized Maghemite Nanotubes. *Chem. Eng. J.* 2012, № 211–212. С. 493 – 500.

133. Shaker M.A. Adsorption of Co (II), Ni (II) and Cu (II) Ions onto Chitosan-Modified Poly (Methacrylate) Nanoparticles: Dynamics, Equilibrium and Thermodynamics Studies. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2015, № 57. С. 111 – 122.

134. Lutsev L.V. Microwave Properties of Granular Amorphous Carbon Films with Cobalt Nanoparticles. *Journal of Applied Physics*. 2005. vol. 97(10). С. 234 – 239.

135. Suess D. Time resolved micromagnetics using a preconditioned time integration method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002. Vol. 248. С. 298 – 311.

136. Чубукін О.С. Отримання багатошарового радіо поглинаючих покриття на основі феритів з використанням генетичного алгоритму оптимізації ефективної поверхні розсіювання електромагнітних хвиль в діапазоні частот 8 – 12 ГГц. *Системи озброєння і військова техніка*. 2019. № 2(58). С. 132 – 142.

137. Özgür Ü., Alivov Y., Morkoç H. Microwave ferrites, part 1: fundamental properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2009. Vol. 20. С.789 – 834.

138. Сердюк В., Христич О., Лемешев М. Бетони з підвищеними радіаційно-захисними властивостями. Вінницький національний технічний університет, 2020.

139. Boy C., Wolfgang A. H., Chi-Huey W., and Horst-Werner Z.. *Catalysis from A to Z. A Concise Encyclopedia. Fourth, Completely Revised and Enlarged Edition.* Wiley-VCH. 2013. С. 2488 p.

140. Колодько А. Вивчення стійкості відходів очищення промислових стічних вод у складі лужних цементів. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2017. Вип. 28. С. 180 –186.

141. Krivenko P. Utilization of industrial waste water treatment residues in alkali activated cement and concretes. *Key Engineering Materials*. 2018. №761. С. 35 – 38.

142. Caza P., Rodrigo D. and Pamela V. Implications of Spraying Powder Paint Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Vol. 619 LNNS. С. 455 - 467.

143. Larson C. Some structural aspects and future challenges for the global surface finishing industry. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 2022. Vol. 100. С. 181 – 184.

144. Gots V.I., Lastivka O.V. and Tymoshenko S.A. Fillers for modification of polyester powder coating. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2020. vol. 907. 0120511.

145. Goz V., Lastivka O. and Shilyuk P. Corrosion resistance of polyester powder coatings using fillers of various chemical nature. *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 864 KEM. С.115 – 121.

146. Набиванець Б.Й. Аналітична хімія природного середовища / Б.Й. Набиванець, В.В. Сухан, Л.В. Калабіна – К. :Либідь, 1996. – 201 с.