

## АНОТАЦІЯ

*Колєгова А. С.* Маловідходні екологічно безпечні технології очищення стічних вод від іонів важких металів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі технічних наук за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища» (18 – Виробництво та технології). – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розробці та вдосконаленню комплексних маловідходних технологій очищення стічних вод від іонів важких металів за допомогою іонообмінних та електрохімічних методів для підвищення екологічної безпеки технологічних процесів виробництва на підприємствах.

Збільшення техногенного впливу протягом останнього століття призвело до стрімкого забруднення навколишнього середовища як органічними, так і неорганічними політантами. Одними з неорганічних забруднювачів є сполуки та іони важких металів, що мають токсичний вплив на живі організми. Тому останнім часом з'являється все більше робіт, пов'язаних з очищенням водного середовища від катіонів важких металів.

У першому розділі розглянуто основні джерела утворення та надходження іонів важких металів у навколишнє середовище. Основними джерелами утворення токсичних відходів є машинобудівна промисловість, кольорова металургія, виробництво акумуляторів та гальванічне виробництво, яке є одним із найнебезпечніших серед усіх виробництв. Стічні води гальванічних виробництв мають різноманітний хімічний склад та концентрацію забруднювачів, що завжди залежить від типу виробництва. Сполуки іонів важких металів, таких як мідь, цинк, кадмій і нікель, є одними з

розповсюджених забруднювачів у гальванічному виробництві. Ці метали є мікроелементами, які підтримують різні процеси життєдіяльності, але при перевищенні концентрацій та балансу в організмі можуть призвести до гострих чи хронічних хвороб.

Для очищення стічних вод застосовують різноманітні методи вилучення металів. Найчастіше використовують фізико-хімічні методи очищення. В роботі було проаналізовано переваги та недоліки вибору того чи іншого методу. Серед основних перспективних методів очищення стічних вод від іонів важких металів є сорбційні методи, до яких належать іонообмінне вилучення та методи електрохімічної обробки розчинів. Перевагами іонного обміну є ефективність та економічність використання матеріалів під час очищення. Вибір іоніту залежить від технологічного процесу та виду вилучення хімічних сполук та іонів. Відомо, що синтетичні органічні іоніти можна використовувати багаторазово, вони мають велику об'ємну ємність, є стійкими до кислих і лужних середовищ, легко регенеруються та є селективними. Проте одним із головних недоліків іонообмінних смол є утворення концентрованих регенераційних розчинів. Тому іонний обмін доцільно комбінувати з електрохімічними методами вилучення металів у чистому вигляді. Серед електрохімічних методів найчастіше застосовують електрокоагуляцію, електрофлотацію та електродіаліз із застосуванням мембран. Останній метод є найперспективнішим, оскільки за його допомогою можна концентрувати кислоти, повертати їх до технологічного процесу і вилучати метали в чистому вигляді, без осадів.

У другому розділі представлено основні характеристики об'єктів та методів дослідження, розглянуто фізико-хімічні властивості іонообмінної смоли КУ-2-8 та монополярної мембрани марки МА-41. Наведено схеми експериментальних установок та основні процеси, які відбувалися при вилученні катіонів металів. Також представлені методи вимірювання концентрацій іонів важких металів, лужності та кислотності. Показані

обладнання та прилади, що використовувались, а також методики математичної обробки експериментальних результатів.

У третьому розділі представлено результати іонообмінного очищення іонів важких металів із модельних розчинів за допомогою катіоніта КУ-2-8 у кислотній та сольовій формах. Було вивчено процеси сорбції та регенерації іонів міді, кадмію, нікелю і цинку та їх сумішей при концентраціях від 2,5 до 25 ммоль/дм<sup>3</sup> (від 5 до 50 мг-екв/дм<sup>3</sup>). ПОДЄ іоніту по даних металах складала приблизно 1000 ммоль/ дм<sup>3</sup> (2000 мг-екв/дм<sup>3</sup>), що вказує на досить ефективну сорбцію. В усіх проведених експериментах з підвищенням концентрації металу зростала кислотність розчину, профільтованого через іоніт у кислотній формі, що свідчить про еквівалентний обмін протонів на катіони металу. Згідно з теоретичними даними катіоніт КУ-2-8 має селективність за іонами кадмію нижчу, ніж селективність за іонами міді, цинку або нікелю, його сорбція на іоніті проходила досить ефективно, як при використанні катіоніту в сольовій та кислотній формах. Сорбція сумішей іонів важких металів на катіоніті в кислотній формі показала, що метали мають майже однакову селективність вилучення. ПОДЄ металів складала в середньому 521,5 ммоль/дм<sup>3</sup> (1043 мг-екв/дм<sup>3</sup>). У цілому сорбція металів відбувалась досить ефективно. Також було розраховано математичну модель Томаса для всіх вихідних кривих сорбції в динамічних умовах за постійної швидкості через шар іоніту в іонообмінній колонці. Теоретично отримані криві корелюють з експериментально отриманими кривими.

Відмічено, що фільтрування розчинів з низькими концентраціями металів є досить складним і тривалим процесом в експериментальних умовах. При об'ємі іоніту 20 см<sup>3</sup>, фільтрувальній швидкості 0,9 дм<sup>3</sup>/год і концентрації іонів металів 0,5 ммоль/дм<sup>3</sup> (1 мг-екв/дм<sup>3</sup>) потрібно пропустити приблизно 100 дм<sup>3</sup> розчину. Тому, користуючись моделлю Томаса, було розраховано криві сорбції при фільтруванні розчинів з низькими концентраціями металів. Проскок металів відбувався при витраті 30-40 дм<sup>3</sup> розчинів, а повне вичерпання ємності катіоніту КУ-2-8 відбувалось при пропусканні 80-100 дм<sup>3</sup>. Також на основі

одержаних результатів отримано залежність об'єму очищеного розчину сульфату міді, цинку, кадмію та нікелю на 1 дм<sup>3</sup> катіоніту КУ-2-8 у кислій формі від початкової концентрації та концентрації проскоку. Це показує, що одержані результати можна застосовувати для проектування установок очищення вод, що забруднені йонами металів.

Регенерація іоніту 5 %, 8 % та 10 %-ю сірчаною кислотою показала, що ефективність десорбції збільшується з підвищенням концентрації кислого розчину. При використанні 10 %-го розчину сульфату натрію десорбція міді відбувається краще, ніж для 10 %-ї сірчаної кислоти, оскільки селективність катіоніту вища за йонами Na<sup>+</sup> у порівнянні з H<sup>+</sup>. Регенерація іоніту КУ-2-8 у Cd<sup>2+</sup>-формі при використанні 5 % та 8 %-ї сірчаної кислоти проходила менш ефективно, ніж у випадку десорбції міді та цинку. Досить ефективно проходила регенерація іонів важких металів із катіоніту, який був у змішаній сольовій формі. З отриманих результатів видно, що при високих концентраціях дані іони практично сорбуються і десорбуються однаково ефективно, тому використати ці процеси для розділення катіонів у таких умовах практично неможливо. Ступінь десорбції металів сягає 70-100 %.

У четвертому розділі було вивчено процеси електроекстракції іонів міді, кадмію, цинку та нікелю, а також їх сумішей. Вилучення іонів міді в одно- та двокамерному електролізері показало високу ефективність процесу, ефективність вилучення досягла 100 %. Встановлено, що вихід за струмом зростає у двокамерному електролізері в порівнянні з однокамерним. Електродіаліз сульфату цинку в однокамерному електролізері відбувається неефективно, при підвищенні кислотності розчину процес електролізу зупиняється, у той самий час процес вилучення цинку в двокамерному електролізері відбувається до кінця. Показано, що вилучення хлориду цинку з розчинів відбувається досить ефективно, але з великими енергозатратами та виділенням активного хлору. Вивчено електроекстракцію суміші іонів міді та цинку, міді та кадмію, міді та нікелю в однокамерному електролізері. В усіх випадках осадження іонів міді відбувалось ефективно, при незмінних

концентраціях інших іонів металів. Також встановлено, що кислотність розчину мало впливає на вилучення іонів міді. Отже, електрохімічні процеси можна використовувати в технологічних схемах разом з іонним обміном. Утворену кислоту після електролізу можна використовувати повторно у виробництві або при іонообмінних процесах очищення. Метал, що виділився на катоді можна вилучати у чистому вигляді повертаючи в технологічні процеси виробництва або продавати. В роботі були представлені комплексні технологічні схеми очищення стоків, що забруднені важкими металами, а саме міді, цинку, нікелю та кадмію. Розглянуто та представлено способи утилізації відпрацьованих іонітів. В залежності від властивостей іоніту можна вибирати метод утилізації. Іоніти можна висушувати, зменшувати об'єм, цементувати або спалювати.

Отже, використання іонообмінних та електрохімічних методів є більш перспективним в порівнянні з іншими методами очищення стічних вод від іонів важких металів. Дані методи легко впроваджувати на виробництві. Вони є маловідходними та екологічно безпечними.

*Ключові слова:* іонний обмін, іоніт, електроліз, іони важких металів, регенераційний розчин, мембрана, сорбція.

## SUMMARY

*Kolihova A. S. Low-waste environmentally-safe technologies for wastewater treatment from heavy metal ions. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.*

Dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 183 «Environmental protection technology» (18 - Manufacturing and technology). – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2020.

The dissertation is devoted to the development and improvement of the complex low-waste technology of wastewater purification from heavy metal ions by

means of ion-exchange and electrochemical methods to increase the environmental safety of production technological processes at enterprises.

The increase in man-made impact in the last century has led to rapid pollution of the environment, both organic and inorganic pollutants. Some of the inorganic contaminants are compounds and ions of heavy metals that have a toxic effect on living organisms. Therefore, in recent years, there are more and more work related to the purification of the aquatic environment from heavy metal cations.

Chapter 1 considers the main sources of formation and discharge of heavy metal ions into the environment. The main sources of toxic waste are the machine-building industry, non-ferrous metallurgy, battery production and galvanic production, which is one of the most dangerous among all industries. Wastewater from galvanic production has a different chemical composition and concentration of pollutants, which always depends on the type of production. Heavy metal ion compounds such as copper, zinc, cadmium and nickel are among the most common contaminants in electroplating. These metals are trace elements that support various vital processes, but in excess amount and concentration in the body they can lead to acute or chronic diseases.

Various methods of metal removal extraction are used for wastewater treatment. Physico-chemical cleaning methods are the most commonly used. The advantages and disadvantages of choosing one or another method were analyzed. Among the main perspective methods of wastewater treatment from heavy metal ions are sorption methods, which include ion exchanger removal and methods of electrochemical treatment of solutions. The advantages of ion exchanger are efficiency and economy use of materials during treatment. The choice of ion exchanger depends on the technological process and the type of removal of chemical compounds and ions. It is known that synthetic organic ion exchange resins can be reused, they have a large volume capacity, are resistant to acidic and alkaline environments, easily regenerated and selective. But one of the main disadvantages of ion exchanger is the formation of concentrated regeneration solutions. Therefore, ion exchanger should be combined with electrochemical methods for removal of metals

in pure form. Among the electrochemical methods, electrocoagulation, electroflotation and electrodialysis using membranes are most often used. The latter method is the most promising, because it is possible to concentrate acids and return them to the process and remove metals in pure form, without sediment.

Chapter 2 presents the main characteristics of objects and research methods, considers the physicochemical properties of KU-2-8 ion exchange resin and MA-41 monopolar membrane brand. Diagrams of experimental installations and the main processes that took place during the removal of metal cations are provided. Also, methods for measuring the heavy metal ion concentrations, alkalinity and acidity are presented. The equipment and devices used, as well as methods of mathematical analysis of experimental results are shown.

Chapter 3 shows the results of ion exchanger method for heavy metal ions removal from model solutions using KU-2-8 cation exchange resin in acid and salt forms. The processes of sorption and regeneration of copper, cadmium, nickel and zinc ions and their mixtures concentrations from 2,5 to 25 mmol/dm<sup>3</sup> (from 5 to 50 meq/dm<sup>3</sup>) were studied. The TEDC of the ion exchanger for these metals was approximately 1000 mmol/dm<sup>3</sup> (2000 meq/dm<sup>3</sup>), which indicates a very efficient sorption. In all experiments performed with increasing metal concentration, the acidity of the solution, filtered through the cation in acid form, was increasing too, indicating the equivalent exchange of protons for metal cations. According to theoretical data, KU-2-8 cation exchange resin has a lower selectivity for cadmium ions than for selectivity for copper, zinc or nickel ions, its sorption on the resin was quite effective, as when using the cation exchange resin in salt and acid forms. Sorption of mixtures of heavy metal ions on the cation exchanger in acid form showed that the metals have almost the same selectivity of removal. TEDC metals averaged 521,5 mmol/dm<sup>3</sup> (1043 meq/dm<sup>3</sup>). In general, the sorption of metals was quite efficient. The mathematical Thomas model was also calculated for all initial sorption curves under dynamic conditions at a constant velocity through the ion exchange resin layer in the ion exchange column. Theoretically obtained curves correlate with experimentally obtained curves well.

It is noted that the filtration of solutions with low concentrations of metals is a rather complex and long process in experimental conditions. At a ion exchanger volume of 20 cm<sup>3</sup>, a filtration rate of 0.9 dm<sup>3</sup>/h and a metal ion concentration of 0,5 mmol/dm<sup>3</sup> (1 meq/dm<sup>3</sup>), approximately 100 dm<sup>3</sup> of solution must be passed. Therefore, using the Thomas model, sorption curves were calculated when filtering solutions with low metal concentrations. The leakage of metals occurred at the consumption of 30-40 dm<sup>3</sup> of solutions, and the complete depletion of the capacity of the KU-2-8 cation exchange resin occurred at the passage of 80-100 dm<sup>3</sup>. Also, based on the obtained results the dependence of the volume of the purified solution of copper, zinc, cadmium and nickel sulfate per 1 dm<sup>3</sup> of the KU-2-8 cation exchange resin in acid form on the initial concentration and the concentration of leakage was obtained. This shows that the obtained results can be used for the design of water treatment plants contaminated with metal ions.

Regeneration of ion exchanger with 5 %, 8 % and 10 % sulfuric acid showed that the desorption efficiency increases with increasing concentration of acidic solution. When using the 10 % solution of sodium sulfate, the desorption of copper is more efficient than for 10 % sulfuric acid, as the selectivity of the cation exchange resin is higher for Na<sup>+</sup> ions compared to H<sup>+</sup>. Regeneration of KU-2-8 exchange resin in Cd<sup>2+</sup> form using 5 % and 8 % sulfuric acid was less efficient than in the case of desorption of copper and zinc. The regeneration of heavy metal ions from cation exchange resin, which was in mixed salt form, was quite effective. The obtained results show that at high concentrations these ions are practically sorbed and desorbed equally efficiently, so it is almost impossible to use these processes for the separation of cations in these conditions. The degree of desorption of metals reached 70-100 %.

In the chapter 4 the processes of electroextraction of copper, cadmium, zinc and nickel ions, as well as their mixtures were studied. Extraction of copper ions in a one- and two-chamber electrolyzer showed high efficiency of the process, the extraction efficiency reached 100 %. It is established that the current output increases in the two-chamber electrolyzer in comparison with the one-chamber one.



Electrodialysis of zinc sulfate in the one-chamber electrolyzer is inefficient, with increasing acidity of the solution, the electrolysis process stops. At the same time, the process of extracting zinc in the two-chamber electrolyzer is completed. It is shown that the extraction of zinc chloride from solutions is quite efficient, but followed with high energy consumption and release of active chlorine. The electroextraction of the mixture of ions of copper and zinc, copper and cadmium, copper and nickel in a one-chamber electrolyzer was studied. In all cases, the extraction of copper ions occurred efficiently, at constant concentrations of other metal ions. Also, it was found that the acidity of the solution has little effect on the extraction of copper ions. Therefore, electrochemical processes can be used in technological process diagrams together with ion exchange processes. The acid formed after electrolysis can be reused in production or in ion exchange processes. The complex technological scheme of galvanic sewage treatment was presented in the work. The metal released at the cathode can be removed in its pure form by returning to the production processes or sold. The work presented complex technological process diagrams for wastewater treatment contaminated with heavy metals, namely copper, zinc, nickel and cadmium. Methods of utilization of spent ion exchangers are considered and presented. Depending on the properties of the exchange resin, the method of disposal can be chosen. The exchange resin can be dried, reduced in volume, cemented or burned.

Therefore, the use of ion exchange and electrochemical methods is more promising compared to other methods of heavy metal ions removal from wastewater. These methods are easy to implement in production. They are low-waste and environmentally friendly.

*Key words:* ion exchange, ion exchange resins, electrolysis, heavy metal ions, regeneration solution, membrane, sorption.

## **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА:**

*– в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

[1] С. Ю. Кельїна, Д. О. Цимбал, Г. Г. Трохименко, та А. С. Сухарева, “Моніторинг поверхневих вод Миколаївської області за показниками ХСК в умовах гетерогенного фото каталізу”, *Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць*, № 25.6, с. 147-153, 2015. (DOAJ, Index Copernicus, Vernadsky National Library, Crossref, WorldCat, CYBERLENINKA).

[2] А. С. Колєгова, Г. Г. Трохименко, та М. Д. Гомеля, “Вивчення іонообмінних процесів вилучення іонів міді та цинку на катіоніті КУ-2-8 та електрохімічне розділення регенераційних розчинів у системі Cu-Zn”, *Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»*, № 1(29(68)), с. 142-147, 2018. (Index Copernicus).

[3] A. Koliehova, H. Trokhymenko, and M. Gomelya, “Electrochemical extraction of zinc from acid neutral regeneration solutions”, *Environmental Problems*, vol 3, no. 3, pp. 183-187, 2018. (Index Copernicus, Google Scholar, Vernadsky National Library, Crossref).

[4] A. Koliehova, H. Trokhymenko, S. Melnychuk, and M. Gomelya, “Treatment of Wastewater Containing a Mixture of Heavy Metal Ions (Copper-Zinc, Copper-Nickel) using Ion-Exchange Methods”, *Journal of Ecological Engineerin*, vol. 20, iss. 11, pp. 146-151, 2019. doi:10.12911/22998993/112746. (Scopus, Web of Science Core Collection, EBSCOhost, J-Gate, BazTech, IndexCopernicus, Google Scholar, DOAJ, CNKI Scholar).

[5] A. Koliehova, H. Trokhymenko, and N. Magas, “Extraction of  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  cations from industrial wastewater by ionite KU-2-8”, *Technology audit and production reserve*,. № 5/3 (49), pp. 4-9, 2019. doi:10.15587/2312-8372.2019.181411. (Index Copernicus Journals Master List, <sup>1</sup>findr, EBSCO, OpenAIRE, DOAJ , Vernadsky National Library, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, WorldCat, CrossRef, WorldWideScience.org, SAJI, CNKI Scholar, Microsoft Academic Search, Socionet, ZDB, EconBiz, MIAR, Scilit, EconPapers, IDEAS, ERIH PLUS, Dimensions, Julkaisufoorumi, FSTA, JournalTOCs, ResearchBib, ROAD, DRJI, Genamics JournalSeek, PBN, SHERPA RoMEO, CORE, Neliti).

[6] А. С. Колєгова, та Г. Г. Трохименко, “Вивчення процесів сорбції та десорбції іонів кадмію ( $Cd^{2+}$ ) на іоніті КУ-2-8 у кислій формі з мінералізованих стічних вод”, *Збірник наукових праць НУК*, №1 (475), с. 243-250, 2019. doi:10.15589/znp2019.1(475).34. (CrossRef, BASE, Vernadsky National Library, Google Scholar).

– які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[7] А. С. Сухарева, Трохименко Г. Г., та М. Д. Гомеля, “Електрохімічне розділення міді та цинку в процесі іонообмінного очищення води”, на *XII Міжнарод. наук.-практ. конф. Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*, Миколаїв, 2017, с. 121-123.

[8] А. С. Сухарева, Г. Г. Трохименко, та М. Д. Гомеля, “Електрохімічне розділення міді та нікелю в процесі іонообмінного очищення води”, на *VIII Міжнарод. наук.-практ. конф. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*, Миколаїв, 2017, с. 293-294.

[9] А. С. Сухарева, та Г. Г. Трохименко, “Електрохімічне розділення міді, цинку та нікелю в процесі іонообмінного очищення води”, на *V Міжнарод. наук.-практ. конф. Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти*, Київ, 2017. с. 204-206.

[10] А. С. Колєгова, та Г. Г. Трохименко, “Сучасні методи очищення стічних вод гальванічних виробництв від важких металів в Україні”, на *II Всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспір. та молод. наук. з міжнар. участю Актуальні проблеми сучасної хімії*, Миколаїв, 2018. с.50.

[11] A. S. Koliehova, and G. G. Trokhymenko, “Perspective methods of wastewater treatment of electroplating manufacture from copper and zinc ions”, in *The international research and practical conference The development of technical sciences: problems and solutions*, Brno, 2018, pp. 113-116.

[12] А. С. Колєгова, та Г. Г. Трохименко, “Електрохімічне вилучення цинку з кислих та нейтральних регенераційних розчинів”, на *5-у Міжнар.*

конгресі *Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*, Львів, 2018, с. 137.

[13] А. С. Колєгова, та Г. Г. Трохименко, “Аналіз процесів іонного обміну міді, цинку та нікелю на катіоніті КУ-2-8”, на *III Всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспір. та молод. наук. з міжнар. участю Актуальні проблеми сучасної хімії*, Миколаїв, 2019, с. 110-113.

[14] А. С. Колєгова, Г. Г. Трохименко, та М. Д. Гомеля, “Сорбція іонів важких металів ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  та  $\text{Ni}^{2+}$ ) з високомінералізованих стічних вод”, на *XIII Міжнарод. наук.-техн. конф. Проблеми екології та енергозбереження*, Миколаїв, 2019, с. 89-91.

[15] А. С. Колєгова, Г. Г. Трохименко, та М. Д. Гомеля, “Іонообмінне вилучення іонів міді, цинку та нікелю з стічних вод металооброблювальних виробництв”, на *VI Міжнарод. наук.-практ. конф. Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти*, Київ, 2019, с. 120-123.

[16] А. С. Колєгова, та Г. Г. Трохименко, “Сорбція іонів  $\text{Cd}^{2+}$  катіонітом КУ-2-8 В  $\text{H}^+$ -формі”, на *3-й Міжнарод. наук.-практ. конф. Водопостачання та водовідведення: проектування, будова, експлуатація, моніторинг*, Львів, 2019, с. 222-223.

[17] А. С. Колєгова, та Г. Г. Трохименко, “Вилучення іонів міді в одното двокамерному електролізері”, на *IV Всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспір. та молод. наук. з міжнар. участю Актуальні проблеми сучасної хімії*, Миколаїв, 2020, с. 42-46.

– які додатково відображають наукові результати дисертації:

[18] G. Trokhymenko, N. Magas, N. Gomelya, I. Trus, and A. Koliehova, “Study of the Process of Electro Evolution of Copper Ions from Waste Regeneration Solutions”, *Journal of Ecological Engineering*, vol. 21, iss. 2, pp. 29-38, 2020. doi:10.12911/22998993/116351. (Scopus, Web of Science Core Collection, EBSCOhost, J-Gate, BazTech, IndexCopernicus, Google Scholar, DOAJ, CNKI Scholar).

[19] А. С. Сухарева, Г. Г. Трохименко, та М. Д. Гомеля, “Електрохімічне розділення міді та цинку в процесі іонообмінного очищення води”, *Збірник наукових праць НУК*, № 3 (470), с. 114-120, 2017.