

DOI 10.15589/jnn20170314
УДК 628.33
С91

ELECTROCHEMICAL SEPARATION OF COPPER AND ZINC IN THE PROCESS OF ION-EXCHANGE WATER TREATMENT

ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ РОЗДІЛЕННЯ МІДІ Й ЦИНКУ В ПРОЦЕСІ ІОНООБМІННОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

Anastasiia S. Sukhareva
nastya.sukhareva92@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5119-6942

Hanna H. Trokhymenko
antr@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0835-3551

Mykola D. Homelia
m.gomelya@kpi.ua
ORCID 0000-0003-1165-7545

А. С. Сухарева,
асп.¹

Г. Г. Трохименко,
канд. біол. наук, доц.¹

М. Д. Гомеля,
д-р техн. наук, проф.²

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic University», Kyiv*

¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

²*Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет», м. Київ*

Abstract. The publication presents the results of the study on determination of the effectiveness of ion-exchange extraction of copper and zinc from the solution of the mixture of zinc and copper sulfates with the cation exchanger KU-2-8, as well as the effectiveness of regeneration of ion exchange resins in the Cu^{2+} , Zn^{2+} form with the sulfuric acid solution. It is shown that the total sorption capacity of the resin is rather high. Desorption with the KU-2-8 cation exchanger took place effectively. The conditions of the electrochemical separation of copper and zinc in the anode are considered depending on the current density and the solution acidity. The results reveal that the solution acidity has little effect on the effectiveness of extraction of copper ions. The study has shown that it is possible not only to extract these metals on strongly acidic cations from aquatic media with repeated use of the resins, but also to restore processed regeneration solutions with the help of electrolysis to obtain pure metals — copper and zinc. At that, the solutions are suitable for reuse.

Keywords: cation exchanger; sorption; ion exchange; regeneration; electrolysis; current density.

Анотація. Наведено результати досліджень визначення ефективності іонообмінного вилучення міді й цинку з розчину суміші сульфату цинку й міді, ефективності регенерації іонітів в Cu^{2+} , Zn^{2+} формі розчином сірчаної кислоти. Визначено умови електрохімічного розділення міді й цинку залежно від анодної густини струму й кислотності розчинів. Показано, що ці метали не тільки можливо вилучати на сильнокислотних катіонітах із водних середовищ за багаторазового використання іонітів, але й відновлювати електролізом відпрацьованих регенераційних розчинів з отриманням чистих металів — міді й цинку. При цьому оброблені регенераційні розчини придатні для повторного застосування.

Ключові слова: катіоніт; сорбція; іонний обмін; регенерація; електроліз; щільність струму.

Аннотация. Приведены результаты исследований определения эффективности ионообменного извлечения меди и цинка из раствора смеси сульфата цинка и меди, эффективности регенерации ионитов в Cu^{2+} , Zn^{2+} форме раствором серной кислоты. Определены условия электрохимического разделения меди и цинка в зависимости от анодной плотности тока и кислотности растворов. Показано, что данные металлы не только возможно изымать на сильнокислотных катионитах с водных сред при многократном использовании ионитов, но и восстанавливать электролизом отработанные регенерационные растворы с получением чистых металлов — меди и цинка. При этом обработанные регенерационные растворы пригодны для повторного применения.

Ключевые слова: катионит; сорбция; ионный обмен; регенерация; электролиз; плотность тока.

REFERENCES

- [1] Dolina L. F. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii dlya ochistki stochnykh vod ot soley tyazhelykh metallov* [Advanced equipment and technologies for wastewater treatment with removal of salts of heavy metals]. Dnepropetrovsk, Continent Publ., 2008. 254 p.

- [2] *Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini u 2014 rotsi* [National Report on the State of Environment in Ukraine in 2014]. Kyiv, Min-vo ekolohii ta pryrodnykh resursiv Ukrainy, FOP Hrin D. S. Publ., 2016. 350 p.
- [3] Jiaping Paul Chen. *Decontamination of Heavy Metals: Processes, Mechanisms, and Applications*. CRC Press/Taylor and Francis Group Publ., 2012. 454 p.
- [4] Dolina L. F. *Novye metody i oborudovanie dlya obezzarazhivaniya stochnykh vod i prirodnykh vod* [New methods and equipment for disinfection of wastewater and natural water]. Dnepropetrovsk, Continent Publ., 2003. 218 p.
- [5] Homelia M. D., Hlushko O. V., Sahaidak I. S., Radovenchik V. M. *Doslidzhennia protsesiv ochystky vody vid kadmiiu na kationiti KU-2-8* [Study of the processes of water purification from cadmium on the cation exchanger KU-2-8]. *Ekotekhnologii i resursosberezhenie — Ecotechnologies and Resource Saving*, 1998, no. 1, pp. 53–56.
- [6] Homelia M. D., Omelchuk Yu. A., Hlushko O. V., Kamaiev V. S. *Elektrokhimichne vyluchennia ioniv nikeliu z neitralnykh ta kyslykh reheneratsiinykh rozchyniv* [Electrochemical removal of nickel ions from neutral and acidic regeneration solutions]. *Skhidno-evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii — Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, no. 6/6(54), pp. 26–29.
- [7] Yvleeva A. M., Obratsov S. V., Orlov A. A. *Sovremennye metody ochistki vody* [Advanced methods of water treatment]. Tomsk, Tomskiy politekhnicheskii universitet Publ., 2010. 78 p.
- [8] Trokhymenko H. H., Homelia M. D. *Zakhyst pryrodnykh vodoim vid zabrudnennia ionamy midi* [Protection of natural water bodies from contamination with copper ions]. *Visnyk NTUU «KPI» ser. khimichna inzheneriia, ekolohiia i resursozberezhennia — Bulletin of the NTUU «KPI», Chemical engineering, ecology and resource conservation Series*, 2016, no. 1 (15), pp. 93–97.
- [9] Gomelya N. D., Sagaydak I. S. *Razrabotka ekologicheskii chistoy tekhnologii izvlecheniya tsinka iz galvanostokov* [Development of an environmentally friendly technology for zinc extraction from galvanic drains]. *Perspektivnye napravleniya razvitiya ekologii, ekonomiki, energetiki* [Prospects of development of ecology, economy, energy], 1999, pp. 81–85.
- [10] Donchenko M. I., Sribna O. H., Redyso R. M. *Rol pobichnykh reaktsii u protsesakh elektroekstraktsii metaliv iz stichnykh vod metaloobrobnykh vyrobnytstv* [Role of side reactions in the processes electroextraction of metals from the wastewater produced by metal-processing plants]. *Ekotekhnologii i resursozberezhennia — Ecotechnologies and Resource Saving*, 2005, no. 3, pp. 25–30.
- [11] Glushko O. V., Radovenchik V. M. *Malootkhodnaya ionoobmennaya tekhnologiya ochistki galvanostokov ot ionov tsinka* [Low-waste ion-exchange technology for removal of zinc ions from galvanic drains]. *Ekotekhnologii i resursozberezhennia — Ecotechnologies and Resource Saving*, 2006, no. 5, pp. 60–63.
- [12] Gomelya N. D., Glushko Ye. V., Krysenko T. V., Stavskaya S. S. *Elektrokhimicheskoe izvlechenie ionov tsinka i kadmii iz regeneratsionnykh rastvorov pri ionoobmennoy ochistke vody* [Electrochemical extraction of zinc and cadmium ions from regeneration solutions during ion-exchange water purification]. *Ekotekhnologii i resursozberezhennia — Ecotechnologies and Resource Saving*, 2009, no. 2, pp. 68–71.
- [13] Lure Yu. Yu. *Spravochnik po analiticheskoy khimii* [Reference guide on Analytical Chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1989. 448 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Особливо актуальною для України є проблема антропогенного забруднення навколишнього середовища. На кожного жителя України припадає 300 кг шкідливих техногенних речовин, у тому числі й важких металів, які здатні утворювати високотоксичні сполуки [1].

Україна належить до найменш водозабезпечених держав Європи, оскільки запаси місцевих ресурсів річкового стоку на одну людину становлять близько 1 тис. м³ на рік. Щороку з природних водних об'єктів забирається приблизно 15 млрд м³ води й скидається в поверхневі водні об'єкти — 7 тис. млн м³ стічних вод. Разом зі стічними водами в поверхневі водні джерела у 2014 р. скинуто 1629 тис т. водорозчинних

солей, 437,6 тис т. сульфатів, 451,4 тис. т. хлоридів, 11,2 тис т. нітритів, 46,5 тис. т. нітратів, 6,3 тис т. азоту амонійного [2].

Важкі метали в основному потрапляють до стічних вод від кольорової металургії, лакофарбової промисловості, машинобудівної галузі, гальванічних виробництв, виробництва акумуляторів і скла, хімічної обробки рослин, фосфорних мінеральних добрив тощо [1].

Гальванічне виробництво споживає відносно небагато води, але його стічні води є одними з найбільш токсичних і шкідливих. У його стічних водах багато важких металів, які потрапляють до навколишнього середовища й накопичуються в живих організмах і донних відкладеннях, осадах, які утворюються

в процесі очищення стічних вод, як на промислових підприємствах, так і на міських очисних спорудах, що перешкоджає їх подальшій утилізації [1].

До важких металів належать залізо, марганець, кобальт, цинк, хром, мідь, молібден, нікель, селен та ін. Якщо вміст важких металів перевищує в 40 разів природний фон, вони стають небезпечними для живих організмів [3].

Існує багато методів, що застосовують для очищення стічних вод, вибір якого залежить від вимог до якості води й доступності. Виділяють такі методи, як фізичні, хімічні, фізико-хімічні, реагентні, а також у природних умовах [4]. Найбільш перспективним методом вилучення іонів важких металів із стічних вод різного походження є іонний обмін, який дозволяє організовувати замкнуті (безстічні) цикли водокористування й забезпечує створення маловідходних процесів переробки відпрацьованих регенераційних розчинів [5]. При цьому для переробки рідких відходів доцільно застосовувати електрохімічні методи, що дають можливість повертати у виробництво цінні важкі метали й багаторазово споживати регенераційні розчини [6].

Особливістю цих методів є можливість відмови від реагентів, які стають все більш дорогими й дефіцитними, а також у компактності установок, безперервності процесу й легшою їх автоматизацією [7].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Іонообмінні методи очищення природних і стічних вод від іонів важких металів можна успішно використовувати за широкого діапазону їх концентрацій, як це показано в роботі [8]. Важливим є і той факт, що іони важких металів добре десорбуються з катіоніту за їх обробки розчинами кислот чи солей [5, 6], а також те, що більшість катіонів, включаючи і катіони нікелю, можна вилучати з відпрацьованих розчинів за електрохімічного відновлення у вигляді металевих порошків [6]. Особливо легко виділяються електролізом із водних розчинів мідь [8] і кадмій [5], значно важче цинк [9] і нікель [6].

Незважаючи на те, що цинк добре вилучається електролізом концентрованих кислих розчинів з розведених кислих розчинів за концентрації цинку до 50 г/дм³, він практично електрохімічно не відновлюється. Це пов'язано з конкуруючими катодними процесами, насамперед із відновленням водню [10], тому що в нейтральному середовищі цинк досить добре виділяється у вигляді металевих порошків із регенераційних розчинів [11]. Ця проблема розв'язується шляхом використання двокамерних електролізерів зі аніанітовою мембраною.

Попри такі розробки, в очищенні вод від іонів важких металів є одна невирішена проблема, яка суттєво стримує впровадження розглянутих проце-

сів у виробництво й стосується розділення металів, оскільки в стічних водах завжди присутні суміші металів й розділити їх за сорбції на катіоніті надто складно, тому що ряд катіонів, наприклад, Cu²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺ і багато інших мають близьку селективність за сорбції на сильнокислотних катіонітах.

Через це цікавим видається застосування електродіалізу для розділення різних металів, ураховуючи їх специфіку відновлення в кислих і нейтральних розчинах.

МЕТОЮ роботи було на прикладі іонів міді і цинку визначити умови їх розділення за електрохімічного вилучення іонів міді електролізом у кислому середовищі.

Для досягнення пропонованої мети передбачається розв'язати такі завдання:

- дослідити процеси сорбції іонів міді й цинку з розчину суміші даних іонів на катіоніті КУ-2-8 у кислотній формі й процеси їх десорбції розчином сірчаної кислоти;

- визначити параметри процесу відновлення міді з розчину суміші іонів міді й цинку залежно від надлишку сірчаної кислоти;

- дати оцінку перспективі електрохімічного розділення іонів міді й цинку за умови створення маловідходних іонообмінних процесів їх вилучення з води.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для вивчення процесів сорбції й десорбції іонів міді й цинку брали сильнокислотний катіоніт КУ-2-8.

Іоніт об'ємом 20 см³ розміщали в скляну колонку діаметром 2 см. Витрата розчину за сорбції становила 15 см³/хв, витрата розчину за регенерації — 2–5 см³/хв.

Модельний розчин містив сульфат міді в концентрації 20,4 мг-екв/дм³ і сульфат цинку в концентрації 27,6 мг-екв/дм³. У процесі сорбції відбирали проби об'ємом 100 см³ й аналізували на вміст міді за методикою [13], та цинку, використовуючи метод трилонометрії, з урахуванням концентрації міді [13]. Крім того, у розчинах контролювали рН і кислотність.

Для регенерації застосовували 10%-й розчин сірчаної кислоти. Об'єм проби — 20 см³. У пробах також контролювали вміст міді та цинку.

Для електролізу брали проби розчину сульфату міді концентрацією 472,5 мг-екв/дм³ і цинку концентрацією 480 мг-екв/дм³ із концентрацією сірчаної кислоти від 0 до 1000 мг-екв/дм³. Об'єм проби складав 400 см³. Ці розчини близькі за складом до отриманих регенераційних розчинів. Як електроди використовували катод із нержавіючої сталі й титановий анод, покритий оксидом рутенію. Площа аноду становить 12 см². Силу струму змінювали від 2 до 3 А.

Результати сорбції іонів міді й цинку наведено на рис.1. Згідно з вихідними даними за сорбцією, повна обмінна динамічна ємність (ПОДЕ) з цинку іоніту була дещо вищою, порівняно з міддю. Проте це

обумовлено не стільки селективністю іонів цинку, як більшою їх концентрацією у вихідному розчині. Загалом сумарна ємність іоніту була значною й сягала ~ 2000 мг-екв/дм³.

Як видно з рис. 1, у міру сорбції іонів міді й цинку зростала кислотність розчину за рахунок десорбції протонів, що очевидно й зі зниження pH на початковому періоді сорбції. У міру вичерпання ємності катіоніту кислотність розчину знижується, а pH збільшується.

Дані з регенерації катіоніту 10%-ю сірчаною кислотою показано на рис. 2, який свідчить, що регенерація відбувається досить ефективно.

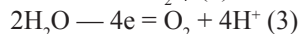
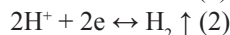
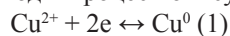
Ступінь регенерації за іонами міді досяг 100%, за цинком — 92,1%. Максимальна концентрація за іонами міді в розчині дорівнювала 302 мг-екв/дм³, за цинком — 351 мг-екв/дм³.

Крім іонів міді та цинку, у розчині присутній надлишок кислоти, тому для вивчення процесів електрохімічного розділення міді й цинку використовували модельні розчини з надлишком і без надлишку сірчаної кислоти.

Як видно з рис. 3, електроліз суміші солей і цинку в однокамерному електролізері проходив в основному з виділенням міді у вигляді порошку. В усіх випадках (криві 1–4) спостерігалось зниження концентрації міді в розчині за відносно незмінної концентрації іонів цинку. Певне коливання концентрації цинку можна пояснити деякими похибками в результатах аналізу. Процес відновлення міді прискорюється за умови підвищення анодної щільності струму. Зміна кислотності розчину мало впливає на процес електролізу.

Як і слід було очікувати, у процесі електрохімічного

відновлення міді кислотність зростала, оскільки на аноді утворювалась кількість протонів, еквівалентна кількості відновленої міді (рис. 4). Загалом катодні й анодні процеси описуються реакціями:



Реакція (1) — основна реакція, що забезпечує відновлення міді на катоді.

Реакція (2) — можлива конкуруюча катодна реакція електролізу води.

Реакція (3) — окислення води на аноді.

Описаний процес проходить незалежно від того, яка реакція (1 чи 2) реалізується на аноді.

Очевидно, саме тому в усіх 4-х випадках відзначено збільшення кислотності розчину в процесі електролізу на величину, еквівалентну кількості відновленої міді. Відхилення коливається межах похибки аналізів дослідів.

Про вплив початкової кислотності розчинів і щільності струму на ефективність електролізу можна говорити за даними, наведеними на рис. 5. З рисунку можна встановити, що початкова кислотність, яка повинна визначати швидкість конкуруючої катодної реакції (2) в такому разі мало впливала на вихід міді за струмом, який більше залежить від концентрації міді, аніж концентрації протонів, адже мідь не окислюється воднем, через що легко виділяється з водних розчинів.

Слід зазначити, що за підвищення щільності струму вихід міді за струмом зменшується, що можна пояснити якраз збільшенням швидкості конкуруючої реакції (2) й втратами енергії на підігрів розчину.

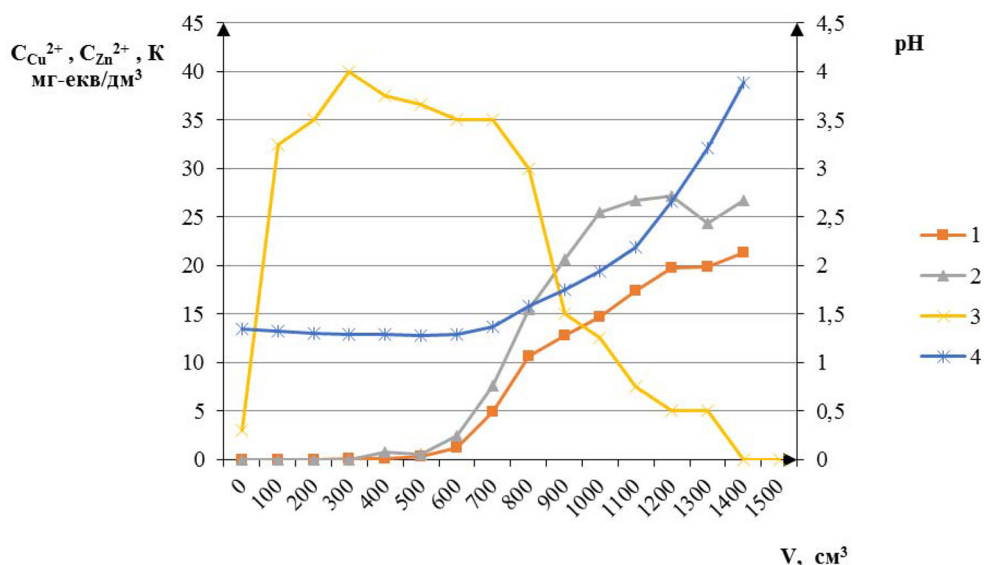


Рис. 1. Залежність вихідної концентрації іонів міді (1), цинку (2), кислотності (3) й pH (4) розчину ($[\text{Cu}^{2+}] = 20$ мг-екв/дм³; $[\text{Zn}^{2+}] = 27,6$ мг-екв/дм³; $[\text{SO}_4^{2-}] = 48$ мг-екв/дм³) при фільтруванні його через катіоніт КУ-2-8 у кислій формі ($V_i = 20$ см³) (ОДЄ₁ = 306 мг-екв/дм³, ПОДЄ₁ = 920 мг-екв/дм³, ОДЄ₂ = 552 мг-екв/дм³, ПОДЄ₂ = 1187 мг-екв/дм³)

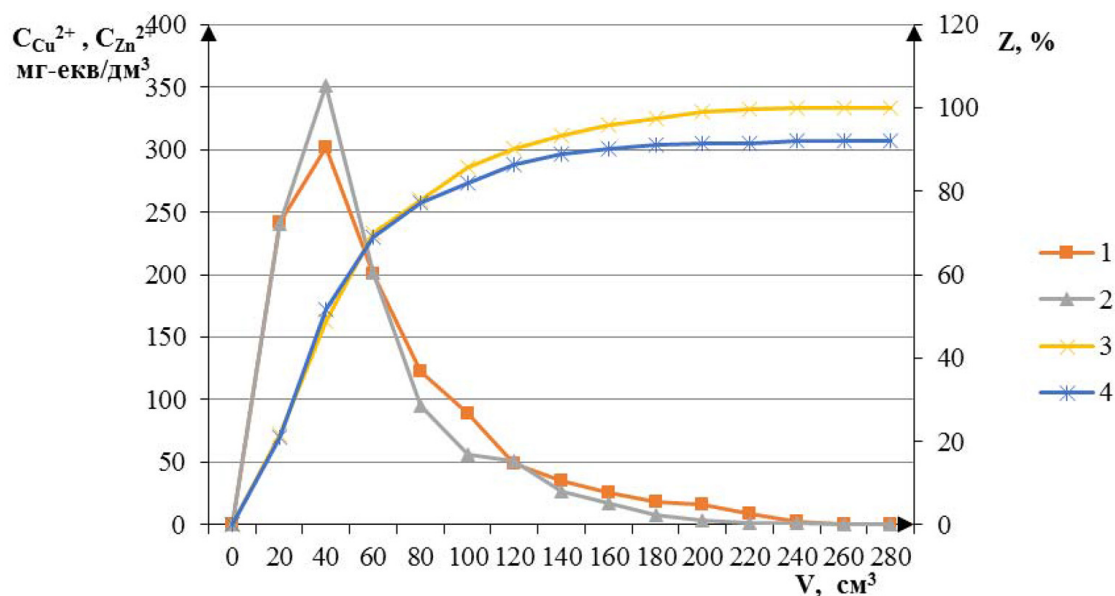


Рис. 2. Залежність вихідних концентрацій іонів міді (1), цинку (2), ступеня десорбції іонів міді (3) й цинку (4) від пропущеного об'єму 10%-го розчину H_2SO_4 через катіоніт КУ-2-8 у Cu^{2+} , Zn^{2+} формі

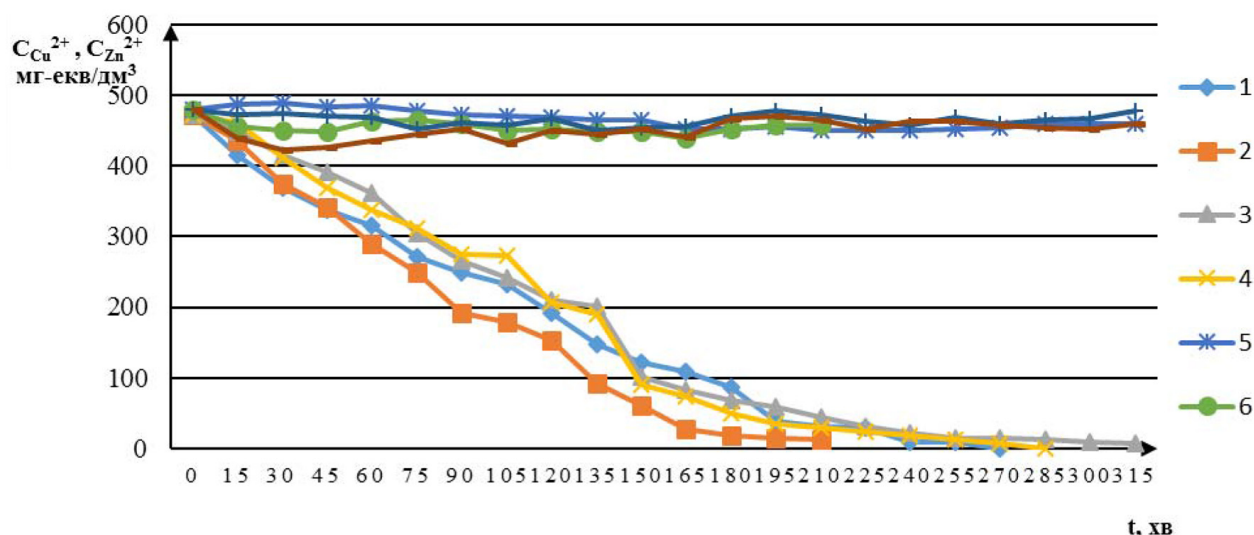


Рис. 3. Залежність залишкової концентрації іонів міді (1, 2, 3, 4) й цинку (5, 6, 7, 8) від часу електролізу розчинів, що містять 472,5 мг-екв/дм³ іонів міді й 480,0 мг-екв/дм³ іонів цинку (1–8) за кислотності розчинів 1000 мг-екв/дм³ (1, 2, 5, 6), 500 мг-екв/дм³ (3, 7) і 0 мг-екв/дм³ (4, 8) за одної густини струму 16,7 А/дм² (1, 3, 4, 5, 7, 8) та 25,0 А/дм² (2, 6)

Результати досліджень показали, що застосування електролізу досить перспективне для розділення сполук міді й цинку за умови використання розчинів з концентрацією до 500 мг-екв/дм³.

Більше того отриманий розчин сульфату цинку з надлишком сірчаної кислоти можна досить легко переробляти в двокамерних електролізерах, як це описано в роботі [12]. В електролізері при цьому використовується аніонітова мембрана МА-40, яка розділяє анодну й катодну область. В анодній камері застосовується слабкий розчин сірчаної кислоти,

у катодну додають робочий розчин, що містить сульфат цинку й надлишок сірчаної кислоти.

На початку електролізу сульфати мігрують в анодну камеру, де відбувається концентрування сірчаної кислоти. У катодній камері йде реакція відновлення й виділення водню (2), яка триває до тих пір, поки рН розчину в катодній камері знизиться до 2,5–3,0. Далі на катоді відбувається відновлення іонів цинку з концентруванням кислоти в анодній камері.

У результаті можна отримати металевий цинк у вигляді порошку й сірчану кислоту. Сірчана кислота

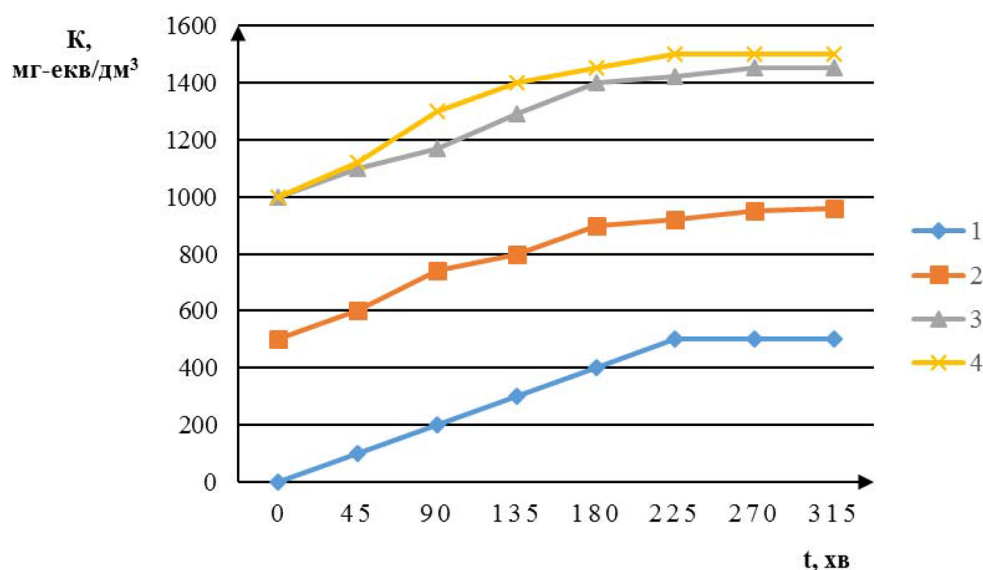


Рис. 4. Зміна кислотності розчину сульфату міді й сульфату цинку ($C_{Cu^{2+}} = 472,5$ мг-екв/дм³, $C_{Zn^{2+}} = 480$ мг-екв/дм³) залежно від часу електролізу за початкової кислотності; мг-екв/дм³: 0 (1), 500 (2), 1000 (3,4) щільності струму 16,7 А/дм² (1, 2, 3) та 25,0 А/дм² (4)

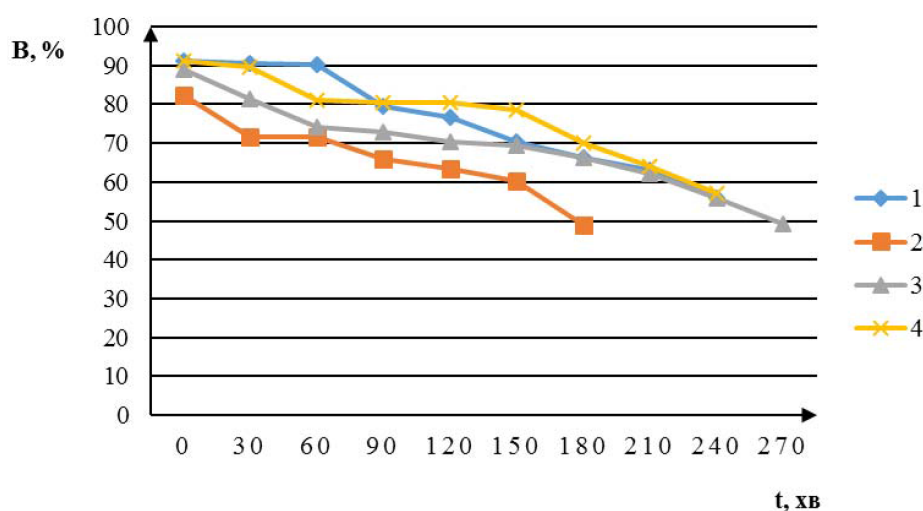


Рис. 5. Зміна виходу за струмом відновленої міді з часом електролізу залежно від складу розчину та щільності струму:

1 — $C_{Cu^{2+}} = 472,5$ мг-екв/дм³, $C_{Zn^{2+}} = 480,0$ мг-екв/дм³, $K = 1000$ мг-екв/дм³, $j = 16,7$ А/дм²; 2 — $C_{Cu^{2+}} = 472,5$ мг-екв/дм³, $C_{Zn^{2+}} = 480,0$ мг-екв/дм³, $K = 1000$ мг-екв/дм³, $j = 25,0$ А/дм²; 3 — $C_{Cu^{2+}} = 472,5$ мг-екв/дм³, $C_{Zn^{2+}} = 480,0$ мг-екв/дм³, $K = 500$ мг-екв/дм³, $j = 16,7$ А/дм²; 4 — $C_{Cu^{2+}} = 472,5$ мг-екв/дм³, $C_{Zn^{2+}} = 480,0$ мг-екв/дм³, $K = 1000$ мг-екв/дм³, $j = 16,7$ А/дм²

придатна для повторної регенерації катіоніту. Таким чином, можна реалізувати безвихідний процес вилучення міді й цинку за іонообмінного їх вилучення з води.

ВИСНОВКИ. 1. Показано, що іони міді й цинку ефективно сорбуються на катіоніті КУ-2-8 в кількостях, пропорційних їх вмісту в розчинах. Застосування 10%-го розчину сірчаної кислоти забезпечує практично повну десорбцію катіонів.

2. Встановлено, що за електролізу розчину, який містить суміш катіонів міді й цинку в однокамерно-

му електролізері в нейтральному й кислих розчинах відбувається ефективне відновлення іонів міді без зміни концентрації іонів цинку в процесі зростання кислотності розчину, на величину, еквівалентну виділеним іонам міді. Вихід за струмом міді сягає 90–99% і знижується з підвищенням концентрації іонів міді.

3. Визначено, що за умови виділення іонів цинку в двокамерному електролізері з кислих розчинів з отриманням металевого цинку й сірчаної кислоти можна організовувати маловідходну технологію вилучення міді й цинку з розчину їх суміші.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Долина Л. Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов [Текст] : монография / Л. Ф. Долина. — Днепропетровск : Континент, 2008. — 254 с.
- [2] Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2014 році [Текст]: офіц. текст. — К. : Міністерство екології та природних ресурсів України, ФОП Грінь Д.С. — 2016. — 350 с.
- [3] Jiaping Paul Chen Decontamination of Heavy Metals: Processes, Mechanisms, and Applications [Text] / Paul Chen Jiaping. — CRC Press/Taylor and Francis Group, 2012. — 454 p.
- [4] Долина Л. Ф. Новые методы и оборудование для обеззараживания сточных вод и природных вод [Текст] / Л. Ф. Долина. — Днепропетровск : Континент, 2003. — 218 с.
- [5] Дослідження процесів очистки води від кадмію на катіоніті КУ-2-8 [Текст] / М. Д. Гомеля, О. В. Глушко, І. С. Сагайдак, В. М. Радовенчик // Екотехнології и ресурсосбережение. — 1998. — № 1. — С. 53–56.
- [6] Електрохімічне вилучення іонів нікелю з нейтральних та кислих регенераційних розчинів [Текст] / М. Д. Гомеля, Ю. А. Омельчук, О. В. Глушко, В. С. Камаєв // Східно-європейський журнал передових технологій. — 2011. — № 6/6(54). — С. 26–29.
- [7] Ивлева А. М. Современные методы очистки воды [Текст]: учебное пособие / А. М. Ивлева, С. В. Образцов, А. А. Орлов. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010. — 78 с.
- [8] Трохименко Г. Г. Захист природних водойм від забруднення іонами міді [Текст] / Г. Г. Трохименко, М. Д. Гомеля // Вісник НТУУ «КПІ» сер. хімічна інженерія, екологія і ресурсозбереження, зб. наукових праць. — 2016. — № 1(15). — С. 93–97.
- [9] Гомеля Н. Д. Разработка экологически чистой технологии извлечения цинка из гальваносток [Текст] / Н. Д. Гомеля, И. С. Сагайдак // Перспективные направления развития экологии, экономики, энергетики: Сб. науч. ст. — Одесса : ОЦНТЭИ, 1999. — С. 81–85.
- [10] Донченко М. І. Роль побічних реакцій у процесах електроекстракції металів із стічних вод металообробних виробництв [Текст] / М. І. Донченко, О. Г. Срібна, Р. М. Редисо // Екотехнології и ресурсосбережение. — 2005. — № 3. — С. 25–30.
- [11] Глушко О. В. Малоотходная ионообменная технология очистки гальваносток от ионов цинка [Текст] / О. В. Глушко, В. М. Радовенчик // Екотехнології и ресурсосбережение — 2006. — № 5. — С. 60–63.
- [12] Электрохимическое извлечение ионов цинка и кадмия из регенерационных растворов при ионообменной очистке воды [Текст] / Н. Д. Гомеля, Е. В. Глушко, Т. В. Крысенко, С. С. Ставская // Екотехнології и ресурсосбережение. — 2009. — № 2. — С. 68–71.
- [13] Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии [Текст] / Ю. Ю. Лурье. — М. : Химия, 1989. — 448 с.

© А. С. Сухарева, Г. Г. Трохименко, М. Д. Гомеля

Надійшла до редколегії 22.05.17

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. В. М. Радовенчик