

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2019.1\(475\).34](https://doi.org/10.15589/znp2019.1(475).34)
УДК 628.33

RESEARCH OF SORPTION AND DESORPTION PROCESSES OF CADMIUM IONS (Cd^{2+}) ON KU-2-8 IONITE IN ACID FORM FROM MINERALIZED WASTEWATER

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ СОРБЦІЇ ТА ДЕСОРБЦІЇ ІОНІВ КАДМІЮ (Cd^{2+}) НА ІОНІТІ КУ-2-8 У КИСЛІЙ ФОРМІ З МІНЕРАЛІЗОВАНИХ СТІЧНИХ ВОД

Anastasiia S. Kolichova
nastyia.sukhareva92@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5119-6942

Ganna G. Trohymenko
antr@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0835-3551

А. С. Колєгова,
аспірант

Г. Г. Трохименко,
д-р техн. наук, професор

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Infiltrating cadmium compounds to the environment comes mainly from untreated wastewater of engineering industry, non-ferrous metallurgy, galvanic industries, etc. Therefore, the main aim of protecting the aquatic environment was to develop and improve waste-free wastewater treatment technologies containing high concentrations of cadmium.

There are many methods of treatment sewage of electroplating manufacture, but their choice depends on the requirements for water quality and methods availability. Ion exchange is one of the promising methods for extracting heavy metal ions from waste galvanic waters.

The aim of the investigation was to study the processes of sorption and desorption of cadmium ions on the KU-2-8 ionite in the acidic form under dynamic conditions. The efficiency of sorption of Cd^{2+} on the cation exchanger KU-2-8 in H^+ -form by ion-exchange method from highly mineralized model solutions of sewage and washing waters of metalworking enterprises was investigated in the work. The processes of ionite regeneration from cadmium ions with sulfuric acid were studied and the efficiency of ion exchange for the improvement of waste-free technologies of sewage and flushing water of metalworking enterprises was studied.

Removing cadmium ions was carried out in an ion exchange column containing a 20 cm^3 ion exchange resin. The concentration of metal ions was 10–50 meq/dm^3 . The regeneration of saturated ionite with metals was carried out by 5, 8 and 10% sulfuric acid. The concentration of heavy metal ions, acidity, alkalinity and pH of the medium were controlled in the samples.

The sorption results showed that when the sorption of 0.01 n model solution of cadmium sulfate the total capacity of the ion exchanger reached 1808.75 meq/dm^3 , the sorption of 0.02 n and 0.05 n solution of the total capacity of the ion exchanger reached 2063.75 meq/dm^3 , 2082 meq/dm^3 , respectively. The increase in the capacity of the ionite can be explained by the fact that as the concentration of metal cations increases, the capacity also grows.

In general, the results of studies have shown that the use of ion exchange is quite effective for the extraction of heavy metals. The sorption and regeneration efficiency averaged 95%.

The scientific novelty of the work is that for the first time the sorption of cadmium ions at concentrations of 10, 20 and 50 meq/dm^3 was carried out in terms of metal and their desorption of 5, 8 and 10% sulfuric acid from the cation exchanger KU-2-8 in the acidic form.

These results can be used in the development of low-waste technologies for the purification of water from cadmium ions, which increases the environmental friendliness of working processes at metalworking enterprises.

Key words: cadmium ions; heavy metals; cation exchanger; ion exchange; total ion exchange capacity; sewage treatment.

Анотація. Надходження сполук кадмію до навколишнього середовища відбувається в основному від недоочищених стічних вод машинобудівної галузі, кольорової металургії, гальванічних виробництв тощо. Тому головною метою захисту водного середовища було розроблення та вдосконалення безвідходних технологій очищення стічних вод, що містять високі концентрації кадмію.

Існує багато методів очищення стічних вод гальванічних виробництв, але їх вибір залежить від вимог до якості води та доступності. Одним із перспективних методів вилучення іонів важких металів зі стічних гальванічних вод є іонний обмін.

Метою роботи було вивчення процесів сорбції та десорбції іонів кадмію на іоніті КУ-2-8 у кислій формі в динамічних умовах. У роботі досліджено ефективність сорбції Cd^{2+} на катіоніті марки КУ-2-8 у H^+ -формі іонообмінним методом з високомініералізованих модельних розчинів стічних та промивних вод металооброблюваних підприємств. Вивчено процеси регенерації іоніту від іонів кадмію за допомогою сірчаної кислоти та визначено ефективність іонного обміну для вдосконалення безвідходних технологій очищення стічних та промивних вод металооброблюваних підприємств.

Вилучення іонів кадмію проведено в іонообмінній колонці, в якій розміщали іоніт об'ємом 20 см^3 . Концентрація іонів металу становила $10\text{--}50\text{ мг-екв/дм}^3$. Регенерацію насиченого іоніту металами проведено 5, 8 та 10%-ю сірчаною кислотою. Під час відбору проб постійно контролювалися концентрація кадмію, кислотність, лужність та рН.

Результати сорбції показали, що за сорбції 0,01 н модельного розчину сульфату кадмію повна ємність іоніту сягала $1808,75\text{ мг-екв/дм}^3$, за сорбції 0,02 н та 0,05 н розчину повна ємність іоніту сягала $2063,75\text{ мг-екв/дм}^3$, 2082 мг-екв/дм^3 відповідно. Збільшення ємності іоніту можна пояснити тим, що в разі збільшення концентрації катіонів металу ємність також збільшується.

Загалом, результати досліджень показали, що застосування іонного обміну досить ефективно в разі вилучення важких металів. Ефективність сорбції та регенерації сягала в середньому 95%.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше було проведено сорбцію іонів кадмію за концентрацій 10, 20 та 50 мг-екв/дм^3 у перерахунку на метал та їх десорбцію 5, 8 та 10% сірчаною кислотою з катіоніту марки КУ-2-8 у кислій формі.

Дані результати можна використовувати для розроблення маловідходних технологій очищення води від іонів кадмію, що підвищує рівень екологічності процесів обробки металів на металооброблювальних підприємствах.

Ключові слова: іони кадмію; важкі метали; катіоніт; іонний обмін; повна обмінна ємність іоніту; очищення стічних вод.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Важкі метали є одними з небезпечних забруднювачів гідросфери, що утворюються в процесі діяльності людини. Потрапляючи до водойм, вони здатні накопичуватися в живих організмах та утворювати токсичні сполуки, при цьому мігрувати в екосистемі за ланцюгами живлення. Рівень забруднення важкими металами різко зріс за останні 50 років як результат експоненціального збільшення використання важких металів у промислових процесах [1].

Основними джерелами надходження важких металів до навколишнього середовища є кольорова металургія, лакофарбова промисловість, машинобудівна галузь, гальванічне виробництво, виробництво акумуляторів і скла, хімічна обробка рослин, фосфорні мінеральні добрива тощо [2]. Стічні води цих виробництв забруднені солями важких металів, кислотами та лугами, що утворюються під час обробки та промивання деталей [3].

Стічні води гальванічних виробництв значною мірою містять іони важких металів, які є не тільки високотоксичними, але й є цінними компонентами. Адже в наш час для України та інших країн стає актуальним питанням втрата цінних металів та їх вилучення зі стічних вод гальванічних виробництв. Тому постає одна з головних проблем галузі – розроблення нових методів очищення, знезараження, нейтралізації та утилізації забруднених стічних вод на гальваніч-

них підприємствах. Створення замкнених циклів водокористування на гальванічних виробництвах може вирішити цю проблему, використовуючи стічну воду багаторазово, отримуючи метали в чистому вигляді та не забруднюючи навколишнє середовище політантами.

Високотоксичним компонентом для живих організмів, особливо водного середовища, є сполуки кадмію. Іони кадмію накопичуються рослинами, тваринами у водному середовищі, здійснюючи канцерогенний вплив, порушуючи метаболізм білку, знижуючи засвоєння заліза та видаляючи кальцій з організму [4].

Джерелами надходження до навколишнього середовища сполук кадмію, як й інших важких металів, є неочищені або недоочищені стічні води підприємств. Тому головною метою захисту водного середовища було розроблення безвідходних технологій очищення стічних вод, що містять високі концентрації сполук кадмію.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Основним методом вилучення кадмію зі стічних, регенераційних вод металооброблювальних підприємств є сорбція, якій присвячено багато наукових досліджень та розробок [5; 6; 7]. Так, у роботі [8] вивчено адсорбцію іонів важких металів, у тому числі кадмію, сорбентом СВ-1-А. Ефективність очищення води від іонів кадмію сягала 96,4%. Для очищення

можливо використовувати воду з господарсько-питного водопостачання, а також стічні води промислового виробництва.

Вивчені закономірності сорбції іонів свинцю та кадмію отриманими композиційними сорбентами шляхом модифікування спученого перліту бентонітом у статистичних умовах показали, що, змінюючи кислотність середовища, можна домогтися селективності вилучення іонів кадмію і свинцю з водних розчинів. Визначено, що отримані композиційні сорбенти є перспективними для вилучення кадмію з мінералізованих водних розчинів металів [9].

Авторами [10] виготовлений недорогий адсорбент із вулканічної породи з покриттям наночастинок $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ для сорбції Cd(II) з води. Найвищі адсорбційні значення спостерігалися у діапазоні рН 4,0–7,0, а максимальна адсорбційна ємність іонів Cd(II) була 127,23 мг/г, 146,41 мг/г та 158,48 мг/г при 293 К, 303 К та 313 К відповідно. Також було виявлено, що процес адсорбції є ендотермічним та спонтанним, тому сорбент є високоефективним та економічно вигідним для сорбції важких металів.

В інших роботах авторами [11; 12; 13; 14] досліджувалася сорбція іонів кадмію в різних концентраціях на модифікованих сорбентах як природнього, так і синтетичного походження.

Однак найбільш перспективними методами вилучення іонів важких металів зі стічних вод різного походження є іонний обмін [15] та електроліз, що дозволяють організувати замкнуті (безстічні) цикли водокористування й забезпечують створення маловідходних процесів переробки відпрацьованих регенераційних розчинів [16].

Ефективність вилучення катіонів важких металів різними методами зі стічних промивних вод гальванічних виробництв знижується в разі малих концентрацій цих іонів. Тому застосування методів іонного обміну є більш перспективним за концентрування іонів [17] для подальшого відновлення металів електрохімічними методами.

Найбільш практичне значення для знесолення стічних вод знайшли штучні органічні іоніти з великою сорбційною поверхнею. Катіоніт КУ-2-8 є одним із таких іонітів, що має велику обмінну ємність, механічну та хімічну стійкість до зміни параметрів середовища [18]. Іоніт марки КУ-2-8 широко застосовується для знесолення води в різних діапазонах концентрацій катіонів, у тому числі для вилучення важких металів [19; 20]. У цих роботах показано високу поглинаючу здатність даного катіоніту до двовалентних катіонів. Це пояснюється наявністю одного виду фіксованих іонів – сульфогрупи. При цьому, працюючи як у сольовій, так і в кислотній формі, катіоніт легко регенерується як кислотами, так і розчинами солей, що дає змогу створювати широкий спектр комплексних технологій очищення вод, забруднених іонами важких металів.

Кінетика процесу сорбції міді, цинку, кадмію на синтезованих катіонітах марки КУ-2-8 показана на основі експериментальних досліджень у роботі [21]. Також підтверджена висока селективність даного катіоніту до іонів цих металів.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕ ВИРІШЕНИХ РАНИШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

На сьогодні недостатньо вивчені процеси сорбції іонів кадмію на катіоніті марки КУ-2-8 у кислотній формі за високих концентрацій металу. Також є доцільним дослідити процеси десорбції іонів Cd^{2+} 5, 8 та 10% сірчаною кислотою в динамічних умовах.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження було вивчення процесів сорбції та десорбції катіонів кадмію з високомінералізованих стічних вод за допомогою іонного обміну в динамічних умовах.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі задачі:

- дослідити ефективність сорбції іонів кадмію на катіоніті марки КУ-2-8 у кислотній формі іонообмінним методом з високомінералізованих модельних розчинів стічних та промивних вод металообробних підприємств;

- вивчити процеси регенерації катіоніту від іонів кадмію за допомогою сірчаної кислоти та визначити ефективність іонного обміну для створення безвідходної технології очищення стічних та промивних вод металообробних підприємств.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Дослідження процесів сорбції та десорбції модельних розчинів, що містять іони кадмію, проводили на експериментальній іонообмінній установці (рис. 1).

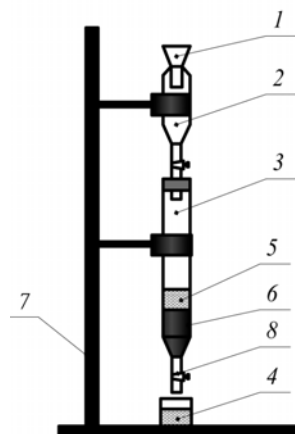


Рис. 1. Колонка для проведення іонообмінного очищення води: 1 – лійка, 2 – крапельна лійка, 3 – колонка, 4 – стакан, 5 – шар модельного розчину над іонітом, 6 – іоніт, 7 – штатив, 8 – гвинтовий затискач

Аналіз вмісту іонів Cd^{2+} , кислотність, лужність та рН у відібраних пробах проводили за допомогою інструментальних методів та титриметрії.

Об'єкт дослідження – модельні розчини та відпрацьовані регенераційні розчини, що містять іони кадмію.

Предмет дослідження – процеси очищення стічних вод від іонів важких металів іонообмінними методами.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Катіоніт об'ємом 20 см³ розміщали в іонообмінну колонку (рис. 1) з діаметром 2 см. Витрата модельного розчину під час сорбції становила 10–15 см³/хв, а витрата розчину під час десорбції іонів металів – 2–5 см³/хв.

Як модельні розчини використовували сіль сульфат кадмію, розчинену в дистильованій воді. Сорбцію та регенерацію проводили на катіоніті за концентрацій: Cd²⁺ – 10, 20, 50 мг-екв/дм³. Під час проведення сорбції відбирали проби об'ємом 100–500 см³ й аналізували на вміст кадмію за методом трилонометрії. Також у пробах контролювали кислотність, лужність та рН.

Регенерацію катіоніту КУ-2-8 проводили 5, 8 та 10% сірчаною кислотою в іонообмінній колонці (рис. 1). Об'єм проб, що відбиралися, становив 20–50 см³.

У пробах також контролювали концентрацію іонів металу, кислотність, лужність та рН середовища.

Результати сорбції іонів кадмію на катіоніті в динамічних умовах представлені на рис. 2, 3, 4.

Як показали дослідження (рис. 2), повна обмінна динамічна ємність іоніту (ПОДЕ) сягає 1808,75 мг-екв/дм³ у разі пропускання 0,01 н модельного розчину, що можна пояснити тим, що за менших концентрацій сорбційна ємність знижується. До проскоку іонів важких металів у аналізованому розчині було пропущено 2,25–2,5 дм³ модельних розчинів, а до повного насичення іоніту потрібно було пропустити 4,25–4,5 дм³, як видно із графіків на рисунку 2.

Під час пропускання модельного розчину з концентрацією 0,02 н ємність іоніту становила в середньому 2063,75 мг-екв/дм³. Об'єм пропущених модельних розчинів до проскоку важких металів був приблизно 1,5 дм³. Для повного насичення катіоніту знадобилося пропустити приблизно 2,75 дм³ розчинів важких металів (рис. 3).

Під час пропускання 0,05 н модельних розчинів ємність катіоніту становила у середньому 2082 мг-екв/дм³. Повне насичення катіоніту відбувалось у разі

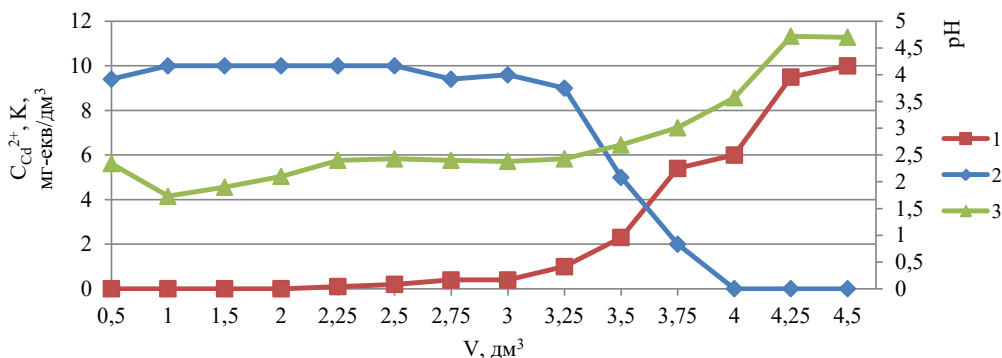


Рис. 2. Залежність концентрації сорбованих іонів кадмію (1), кислотності (2) та рН (3) модельного розчину ($[Cd^{2+}] = 10$ мг-екв/дм³, $[SO_4^{2-}] = 10$ мг-екв/дм³) від пропущеного об'єму скрізь катіоніт КУ-2-8 у H⁺-формі ($V_i = 20$ см³) (ПОДЕ (1) = 1808,75 мг-екв/дм³)

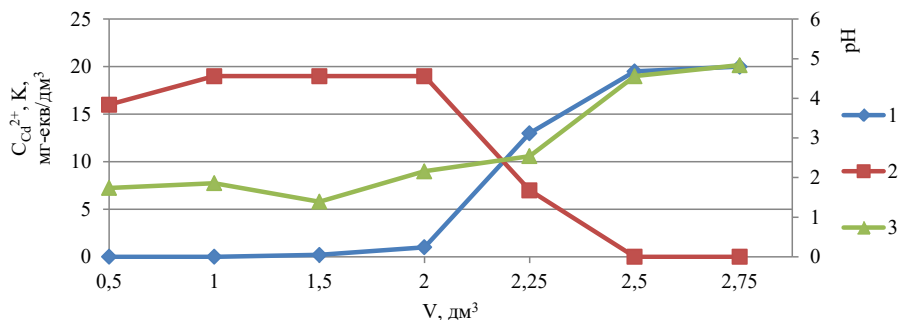


Рис. 3. Залежність концентрації сорбованих іонів кадмію (1), кислотності (2) та рН (3) модельного розчину ($[Cd^{2+}] = 20$ мг-екв/дм³, $[SO_4^{2-}] = 20$ мг-екв/дм³) від пропущеного об'єму скрізь катіоніт КУ-2-8 у H⁺-формі ($V_i = 20$ см³) (ПОДЕ (1) = 2063,75 мг-екв/дм³)

пропускання 1,2 дм³ розчину, до проскоку металів було пропущено 0,6 дм³, як видно з рисунку 4.

Із результатів видно, що зі збільшенням концентрації металів у розчині ємність іоніту дещо зростає. У цілому сорбція кадмію відбувалась досить ефективно.

Результати регенерації іоніту в Cd²⁺-формі показані на рис. 5, 6 та 7. Регенерація іоніту 5, 8 та 10% сірчаною кислотою відбувається досить ефективно. Ступінь регенерації 5% кислотою досягав 95% за кислотності 990 мг-екв/дм³ (рис. 5).

Ступінь регенерації катіоніту 8 та 10% розчином H₂SO₄ сягав 95–100%. Десорбція катіонів кадмію відбувалась до повного вимивання металу з іоніту, поки концентрація в останніх пробах становила 0 мг-екв/дм³. Кислотність відібраних проб (рис. 5, 6 та 7) збільшувалась по мірі вимивання іонів важких металів, а рН зменшувалась відповідно.

Таким чином, для очищення вод, що містять високу концентрацію іонів кадмію, можна застосовувати катіоніт КУ-2-8 у Н⁺-формі, що дасть змогу в подальшому організувати замкнуті цикли очищення стічних вод з отриманням чистих металів та кислот.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Порівнюючи результати інших науковців [22; 23], що проводили сорбцію та десорбцію іонів металів на катіоніті КУ-2-8 в Н⁺ та Na⁺-формі, можна сказати, що процес іонного обміну відбувається досить ефективно як із розбавлених розчинів, так і з концентрованих модельних розчинів, що містять іони важких металів.

Авторами [24] проведено сорбцію іонів кадмію за концентрацій 1 та 100 мг/л на катіоніті в кислій та натрієвій формі. Результати показали, що в разі поглинання металу на іоніті в Na⁺-формі сорбція відбувається ефективніше.

Загалом, катіоніт КУ-2-8 можна використовувати під час очищення води від іонів кадмію в широких діапазонах концентрацій.

ВИСНОВКИ

Проведені експериментальні дослідження процесів сорбції іонів кадмію на катіоніті марки КУ-2-8 у кислій формі з модельних розчинів та оцінена можливість подальшої регенерації катіоніту з використанням сірчаної кислоти різних концентрацій.

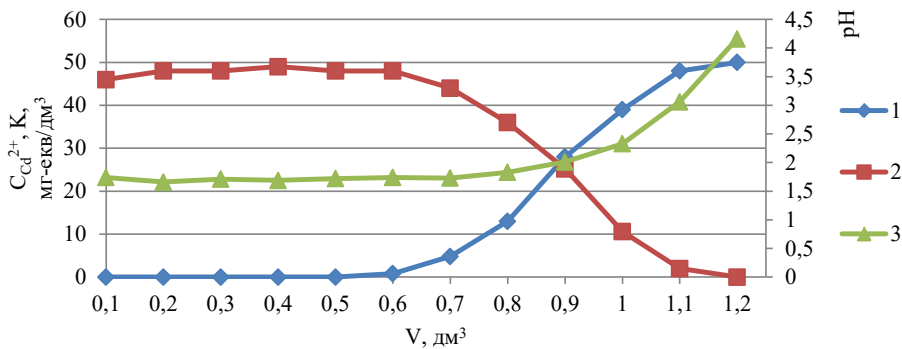


Рис. 4. Залежність концентрації сорбованих іонів кадмію (1), кислотності (2) та рН (3) модельного розчину ([Cd²⁺] = 50 мг-екв/дм³, [SO₄²⁻] = 50 мг-екв/дм³) від пропущеного об'єму скрізь катіоніт КУ-2-8 у Н⁺-формі (V_і = 20 см³) (ПОДС (1) = 2082 мг-екв/дм³)

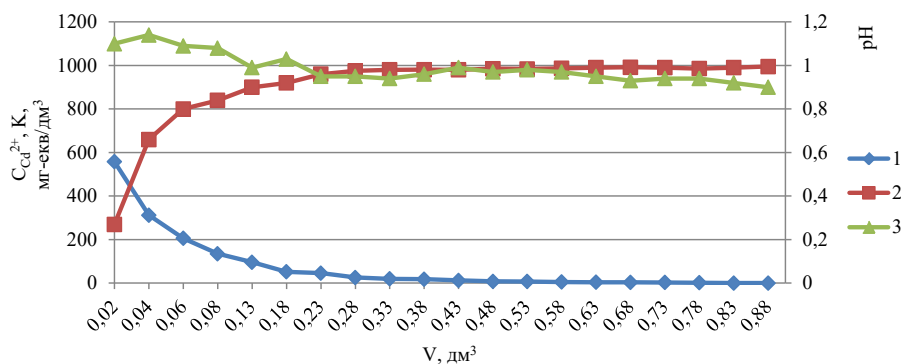


Рис. 5. Залежність вихідних концентрацій іонів кадмію (1), кислотності (2) та рН (3) від пропущеного об'єму 5%-го розчину H₂SO₄ скрізь катіоніт КУ-2-8 у Cd²⁺-формі

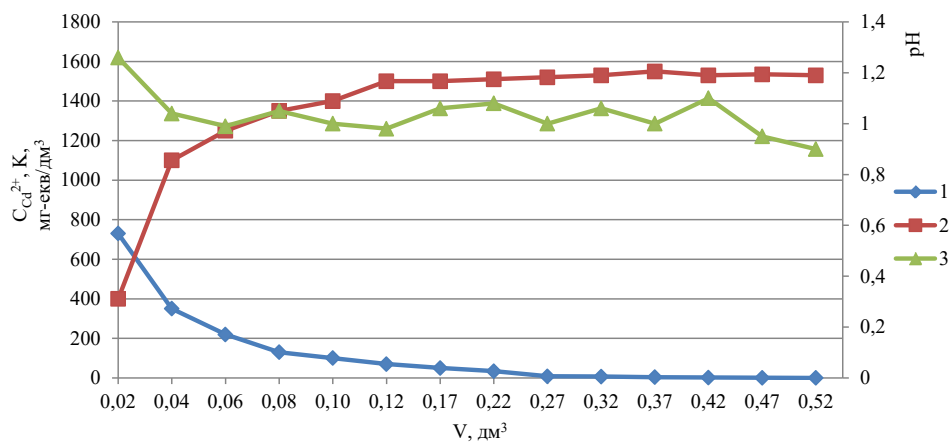


Рис. 6. Залежність вихідних концентрацій іонів кадмію (1), кислотності (2) та pH (3) від пропущеного об'єму 8%-го розчину H_2SO_4 скрізь катіоніт КУ-2-8 у Cd^{2+} -формі

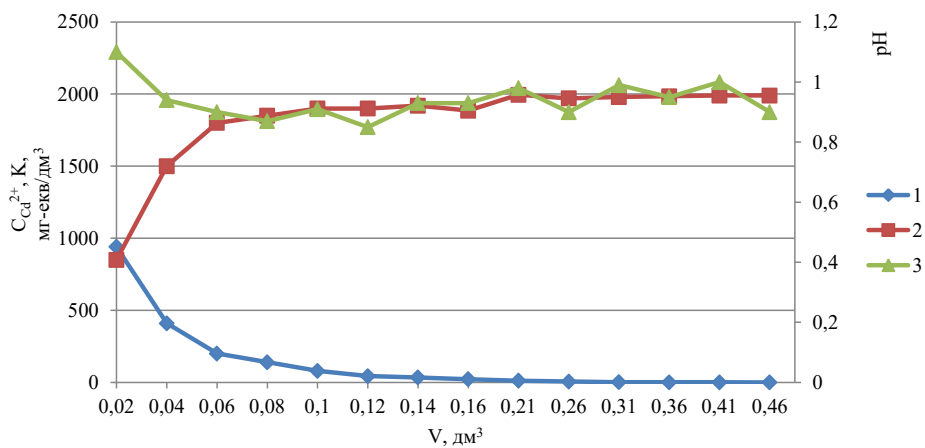


Рис. 7. Залежність вихідних концентрацій іонів кадмію (1), кислотності (2) та pH (3) від пропущеного об'єму 10 %-го розчину H_2SO_4 скрізь катіоніт КУ-2-8 у Cd^{2+} -формі

У результаті досліджень сорбції іонів кадмію на сильнокислотному катіоніті КУ-2-8 у кислої формі доведено високу ефективність процесу очищення від металу на даному іоніті. Також показано зміну обмінної ємності іоніту в залежності від концентрації кадмію в модельних розчинах.

Результати регенерації іоніту КУ-2-8 у Cd^{2+} -формі при 5, 8 та 10% сірчаної кислоти показали, що ефективність регенерації становить у середньому 95%.

Встановлено, що катіоніт КУ-2-8 доцільно використовувати для сорбції важких металів як і з розведених, так і з концентрованих розчинів.

REFERENCES

- [1] Pawan K. B. (2012). *Heavy Metals in Environment*. Lambert Academic Publishing, Germany, 80.
- [2] Dolina, L. F. (2008). *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii dlya ochistki stochnykh vod ot soley tyazhelykh metallov: monografiya*. Dnepropetrovsk: Kontinent. Retrieved from http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/181/1/Dolina_Covrem_texn_tehnolog_ochict_vod.pdf [in Russian]
- [3] Carstea, E. M., Bridgeman, J., Baker, A., Reynolds, D. M. (2016). Fluorescence spectroscopy for wastewater monitoring: A review. *Water Res.*, 95, 205-219.
- [4] Bezak-Mazur, E., Shendrik, T. (2008). *Transkordonna problemy toksykologii dovkillia*. Donetsk: HP «YATs "Donbassyinform"», 300. [in Ukrainian]
- [5] Shachneva, Ye. Yu., Alykov, N. M., Archibasova, D. Ye. (2012). Adsorbtsiya kadmiya iz vodnykh rastvorov na modifitsirovannykh sorbentakh [Adsorption of cadmium from aqueous solutions on modified sorbents]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv [Food Processing: Techniques and Technology]*, 4, 1-5. [in Russian]

- [6] Ilyasova, Kh. N., Nuriev, A. N., Makhmudov, F. T., Yagubov, A. I., Muradova, N. M. (2018). Kinetika sorbtzii ionov kobalta (Co^{2+}) i kadmiya (Cd^{2+}) iz rastvorov na prirodnykh i sinteticheskikh sorbentakh [Kinetic laws of sorption of cobalt (Co^{2+}) and cadmium (Cd^{2+}) ions from solutions on natural and synthetic sorbents]. *AZƏRBAYCAN KİMYA JURNALI [Azerbaijan Chemical Journal]*, 1, 88-95. [in Russian]
- [7] Telkhozhayeva, M., Seilkhanova, G., Rakhym, A., Imangaliyeva, A., & Akbayeva, D. (2018). Sorption of lead and cadmium ions from aqueous solutions using modified zeolite. *Chemical Bulletin of Kazakh National University*, (4), 16-22. doi: 10.15328/cb980
- [8] Shachneva, Ye. Yu., Archibasova, D. Ye., Magomedova, E. M., Zukhayraeva, A. S., (2014). Izvlechenie medi, tsinka i kadmiya iz vodnykh rastvorov nefityanykh mestorozhdeniy sorbentom, poluchennym na osnove opok Astrakhanskoj oblasti [Extractions of copper, zinc and cadmium in water solutions oil fields sorbent received on the basis of molds Astrakhan region]. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya [Geology, geography and global energy]*, 2, 93-104. [in Russian]
- [9] Sirakanyan, M. A., Varderesyan, G. Ts., Kotikyan, S. Yu., Torosyan, A. T., Gasparyan, N. K. (2015). Sorbtziya ionov svintsa i kadmiya iz vodnykh rastvorov kompozitsionnymi sorbentami [The sorption of cadmium and plumbum ions from aqueous solutions by composite sorbents]. *Khimicheskij zhurnal Armenii [Chemical Journal of Armenia]*, 68 (1), 65-70. [in Russian]
- [10] Xianfang Zhu, Tiehong Song, Zhuo Lv, Guodong Ji. (2016). High-efficiency and low-cost $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles-coated volcanic rock for Cd(II) removal from wastewater. *Process Safety and Environmental Protection*, 104(A), 373-381. doi: 10.1016/j.psep.2016.09.019
- [11] Manisha Sharma, Jasmininder Singh, Satyajit Hazra, Soumen Basu. (2019). Adsorption of heavy metal ions by mesoporous ZnO and TiO₂@ZnO monoliths: Adsorption and kinetic studies. *Microchemical Journal*, 145, 105-112. doi: 10.1016/j.microc.2018.10.026
- [12] Shaoqing Zhang, Miao Cui, Junhua Chen, Zhijie Ding, Xuchun Wang, Yang Mu, Changgong Meng. (2019). Modification of synthetic zeolite X by thiourea and its adsorption for Cd (II). *Materials Letters*, 236, 233-235. doi: 10.1016/j.matlet.2018.10.100
- [13] Md. Rabiul Awual, Majeda Khraisheh, Nabeel H. Alharthi, Monis Luqman, Aminul Islam, Mohammad Rezaul Karim, Mohammed M. Rahman, Md. Abdul Khaleque. (2018). Efficient detection and adsorption of cadmium(II) ions using innovative nano-composite materials. *Chemical Engineering Journal*, 343, 118-127. doi: 10.1016/j.cej.2018.02.116
- [14] Di Wu, Yaoguang Wang, Yan Li, Qin Wei, Lihua Hu, Tao Yan, Rui Feng, Liangguo Yan, Bin Du. (2019). Phosphorylated chitosan/ CoFe_2O_4 composite for the efficient removal of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution: Adsorption performance and mechanism studies. *Journal of Molecular Liquids*, 277, 181-188. doi: 10.1016/j.molliq.2018.12.098
- [15] Calmon, C. (1979). *Ion Exchange Pollution Control*. Boca Raton: CRC Press. doi: 10.1201/9781351073868
- [16] Brian, P. Chaplin. (2019). The Prospect of Electrochemical Technologies Advancing Worldwide Water Treatment. *Accounts of Chemical Research*, 52 (3), 596-604. doi: 10.1021/acs.accounts.8b00611
- [17] Nachod, F. C., Schubert, J. (1956). *Ion Exchange Technology*. Imprint Academic Press. doi: 10.1016/C2013-0-12449-X
- [18] Minaieva, V. O. (2013). *Ionnyi obmin ta ionoobminna khromatohrafiya*. Cherkasy: ChNU imeni Bohdana Khmelnytskoho, 128. [in Ukrainian]
- [19] Homelia, M., Ivanova, V., Trus, I. (2017). Efektyvnist vyluchennia ioniv vazhkykh metaliv z rozvedenykh rozchyniv ionnoobminnym metodom [Efficiency of extraction heavy metal ions from diluted solutions by ion-exchange methods]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii [Technical sciences and technologies]*, t. 4, 154-162. doi: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-154-162. [in Ukrainian]
- [20] Verbych, S., Hilal, N., Sorokin, G., Leaper, M. (2005). Ion Exchange Extraction of Heavy Metal Ions from Wastewater. *Separation Science and Technology*, 39 (9), 2031-2040. doi: 10.1081/SS-120039317
- [21] Bobylev, A. Ye., Ikanina, Ye. V., Markov, V. F., Maskaeva, L. N. (2013). Kompozitsionnye sorbenty na osnove kationita KU-2x8 s nanostrukturirovannoy gidroksidnoy ili sulfidnoy aktivnoy komponentnoy. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy [Condensed matter and interphases]*, 15(3), 238-246. [in Russian]
- [22] Homelia, M. D., Trokhymenko, H. H., Hlushko, O. V. (2017). Vplyv ioniv zhorstkosti ta vzaiemnyi vplyv ioniv vazhkykh metaliv na efektyvnist yikh sorbtzii na kationiti. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*, 28, 104-112. [in Ukrainian]
- [23] Malin, V. P., Homelia, M. D., Halimova, V. M. (2016). Efektyvnist zastosuvannia kationitu KU-2-8 pry vyluchenni ioniv midi z vody v prysutnosti ioniv zhorstkosti. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*, 26, 45-55. [in Ukrainian]
- [24] Homelia, M. D., Hlushko, O. V., Sahaidak, I. S., Radovenchyk, V. M. (1998). Doslidzhennia protsesiv ochystky vody vid kadmiu na kationiti KU-2-8 [Investigation of the Water Refining Processes from Cadmium on Cationite KU-2-8]. *Ekotekhnologii i resursoberezhennia*, 1, 53-56. [in Ukrainian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Pawan K. B. 2012. *Heavy Metals in Environment*. Lambert Academic Publishing, Germany. P. 80.
- [2] Долина Л. Ф. (2008) Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов : монография. Днепропетровск. URL: http://eadnurt.diit.edu.ua/bitstream/123456789/181/1/Dolina_Covrem_texn_tehnolog_ochist_vod.pdf
- [3] Carstea E. M. Et al. (2016) Fluorescence spectroscopy for wastewater monitoring: A review. *Water Res.* № 95. P. 205–219.

- [4] Безак-Мазур Е., Шендрік Т. (2008) Транскордонні проблеми токсикології довкілля. Донецьк : ГП «ІАЦ Донбасинформ». С. 300.
- [5] Шачнева Е. Ю., Алыков Н. М., Арчибасова Д. Е. (2012) Адсорбция кадмия из водных растворов на модифицированных сорбентах. *Техника и технология пищевых производств*. № 4. С. 1–5.
- [6] (2018) Кинетика сорбции ионов кобальта (Co^{2+}) и кадмия (Cd^{2+}) из растворов на природных и синтетических сорбентах / Х. Н. Ильясова и др. *AZƏRBAYCAN KİMYA JURNALI*. № 1. С. 88–95.
- [7] (2018) Sorption of lead and cadmium ions from aqueous solutions using modified zeolite / M. Telkhozhayeva et al. *Chemical Bulletin of Kazakh National University*. № (4). P. 16–22. doi: 10.15328/cb980
- [8] (2014) Извлечение меди, цинка и кадмия из водных растворов нефтяных месторождений сорбентом, полученным на основе опок Астраханской области / Е. Ю. Шачнева и др. *Геология, география и глобальная энергия*. № 2. С. 93–104.
- [9] (2015) Сорбция ионов свинца и кадмия из водных растворов композиционными сорбентами / М. А. Сиракян и др. *Химический журнал Армении*. 68 (1). С. 65–70.
- [10] (2016) High-efficiency and low-cost $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles-coated volcanic rock for Cd(II) removal from wastewater / Xianfang Zhu et al. *Process Safety and Environmental Protection*. № 104 (A). С. 373–381. doi: 10.1016/j.psep.2016.09.019
- [11] (2019) Adsorption of heavy metal ions by mesoporous ZnO and TiO_2/ZnO monoliths: Adsorption and kinetic studies / Manisha Sharma et al. *Microchemical Journal*. № 145. P. 105–112. doi: 10.1016/j.microc.2018.10.026
- [12] (2019) Modification of synthetic zeolite X by thiourea and its adsorption for Cd (II) / Shaoqing Zhang et al. *Materials Letters*. № 236. P. 233–235. doi: 10.1016/j.matlet.2018.10.100
- [13] (2018) Efficient detection and adsorption of cadmium(II) ions using innovative nano-composite materials / Md. Rabiul Awual et al. *Chemical Engineering Journal*. № 343. P. 118–127. doi: 10.1016/j.cej.2018.02.116
- [14] (2019) Phosphorylated chitosan/ CoFe_2O_4 composite for the efficient removal of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution: Adsorption performance and mechanism studies / Di Wu et al. *Journal of Molecular Liquids*. № 277. P. 181–188. doi: 10.1016/j.molliq.2018.12.098
- [15] Calmon, C. (1979) Ion Exchange Pollution Control. Boca Raton : CRC Press. doi: 10.1201/9781351073868
- [16] Brian P. Chaplin. (2019) The Prospect of Electrochemical Technologies Advancing Worldwide Water Treatment. *Accounts of Chemical Research*. № 52 (3). P. 596–604. doi: 10.1021/acs.accounts.8b00611
- [17] Nachod F. C., Schubert J. (1956) Ion Exchange Technology. Imprint Academic Press. doi:10.1016/C2013-0-12449-X
- [18] Мінаєва В. О. (2013) Іонний обмін та іонообмінна хроматографія. Черкаси : ЧНУ імені Богдана Хмельницького. 128 с.
- [19] Гомеля М., Іванова В., Трус І. (2017) Ефективність вилучення іонів важких металів з розведених розчинів іонообмінним методом. *Технічні науки та технології*. Т. 4. С. 154–162. doi: 10.25140/2411-5363-2017-4(10)-154-162
- [20] (2005) Ion Exchange Extraction of Heavy Metal Ions from Wastewater / S. Verbych et al. *Separation Science and Technology*. № 39 (9). P. 2031–2040. doi:10.1081/SS-120039317
- [21] (2013) Композиционные сорбенты на основе катионита КУ-2×8 с наноструктурированной гидроксидной или сульфидной активной компонентной / А. Е. Бобылев и др. *Конденсированные среды и межфазные границы*. № 15 (3). С. 238–246.
- [22] Гомеля М. Д., Трохименко Г. Г., Глушко О. В. (2017) Вплив іонів жорсткості та взаємний вплив іонів важких металів на ефективність їх сорбції на катіоніті. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. № 28. С. 104–112.
- [23] Малін В. П., Гомеля М. Д., Галімова В. М. (2016) Ефективність застосування катіоніту КУ-2-8 при вилученні іонів міді з води в присутності іонів жорсткості. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. № 26. С. 45–55.
- [24] (1998) Дослідження процесів очистки води від кадмію на катіоніті КУ-2-8 / М. Д. Гомеля та ін. *Екотехнології и ресурсобереження*. № 1. С. 53–56.