

УДК 504.5:628.33

DOI: 10.25140/2411-5363-2019-1(15)-204-213

Інна Трус, Микола Гомеля, Євгенія Мельниченко, Валерія Мігранова

**ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД ІОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ВІДСТОЮВАННЯМ,
НАНОФІЛЬТРУВАННЯМ ТА ФЛОТАЦІЄЮ**

Актуальність теми дослідження. Проблема погіршення екологічної ситуації стає все більш актуальною. Тому пріоритетним напрямком є розробка ефективних методів очищення води від іонів важких металів.

Постановка проблеми. Нині наявні методи вилучення іонів важких металів із водних розчинів придатні переважно для очищення промислових стічних вод і мало ефективні для очищення природних вод, які містять у високих концентраціях йони кальцію і магнію, які суттєво знижують ємність іонітів по йонах важких металів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Були розглянуті останні публікації у відкритому доступі, включаючи літературу про основні методи очищення та доочищення води від іонів важких металів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Інформація про ефективність очищення природних вод, які містять у високих концентраціях йони кальцію і магнію.

Постановка завдання. Вивчення ефективності видалення іонів міді та свинцю із розведених водних розчинів при використанні фероціаніду калію та флокулянтів при відстоюванні, фільтруванні на фільтрі «синя стрічка», на нанофільтраційній мембрані ОПМН-П та методом флоатації.

Виклад основного матеріалу. Досліджено процеси очищення води від важких металів при їх висадженні фероціанідом калію. Показано, що при очищенні води від іонів міді та свинцю шляхом комплексоутворення з ціанофератом калію при використанні нанофільтрування після відстоювання та механічного фільтрування ефективність вилучення іонів важких металів зростає. Вивчено ефективність зв'язування ціаноферату калію та іонів міді при взаємодії з полікатіонними флокулянтами.

Висновки відповідно до статті. Наведено результати досліджень з вилучення іонів важких металів (на прикладі міді та свинцю), отримані при переведенні важких металів у нерозчинний стан зв'язуванням у фероціанідні комплекси їх відстоюванням та доочищенням методами фільтрування та нанофільтрування. Показано, що застосування нанофільтрування дозволяє підвищити на 4–15 % ступінь очищення води від іонів міді та свинцю. Високу ефективність очищення води від важких металів забезпечив метод флоатації.

Ключові слова: важкі метали; флокулянти; фероціанід калію; нанофільтрування; комплексоутворення; флоатація.

Рис.: 8. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Головними джерелами надходження важких металів у навколишнє природне середовище є природні та антропогенні джерела [1]. Природні джерела – виверження вулканів, тектонічні розломи, геохімічні аномалії і до сьогодні є пониженим джерелом надходження важких металів у довкілля. Вони великою мірою забезпечують наявність важких металів у підземних водах, включаючи і артезіанські води, запаси яких сформувались мільйони років тому. Проте на сьогодні антропогенні джерела надходження важких металів за своєю поширеністю наближаються до природних, а у багатьох випадках і переважають їх.

Постановка проблеми. Найбільш небезпечним є накопичення важких металів у донних відкладах поверхневих водойм [2]. Здебільшого вміст металів у донних відкладах державними службами моніторингу не контролюється, відсутні нормативи допустимих концентрацій важких металів у донних відкладах. Водночас при евтрофікації водойм, за рахунок міграції важких металів у гідробіонтах, їх концентрації у поверхневих водах можуть дуже зростати. Через низьку ефективність очисних споруд на станціях водопідготовки дані токсиканти можуть попадати в питну воду, створюючи пряму загрозу здоров'ю людей. У зв'язку з цим пошук ефективних методів очищення та доочищення води є особливо актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До методів очищення води від іонів важких металів можна віднести реагентні [3; 4], мембранні, електрохімічні [5; 6], іонообмінні [7; 8], сорбційні [9] та біологічні методи [10; 11]. Більшість із згаданих методів мають недостатню ефективність вилучення металів із води. Сорбційні, біологічні та реагентні методи не дозволяють вилучати важкі метали для повторного використання і супроводжуються їх втратами в процесі очищення з осадами. Методи іонного обміну дозволяють ефективно вилучати важкі метали з води і в сукупності з електроекстракцією отримувати цінні компоненти, які придатні для повторного використання [11; 12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Зазначені методи придатні переважно для очищення промислових стічних вод і мало ефективні для очищення природних вод, які містять у високих концентраціях йони кальцію і магнію, які суттєво знижують ємність іонітів по йонах важких металів. Тому розробка ефективних методів вилучення важких металів із води в присутності йонів жорсткості є актуальною проблемою. Традиційний реагентний метод очистки стічних вод від йонів важких металів оснований на використанні сульфідів натрію не набув широкого використання через значний гідроліз сульфідів у воді, забруднення її сірководнем та через недостатню ефективність. З іншого боку, відомо, що фероціаніди важких металів мають дуже низьку розчинність, що сприяє їх ефективному видаленню із води [13]. Цей підхід був використаний у представленій роботі.

Постановка завдання. Метою цієї роботи було визначення ефективності видалення йонів міді та свинцю із розведених водних розчинів при використанні фероціаніду калію та флокулянтів при відстоюванні, фільтруванні на фільтрі «синя стрічка», на нанофільтраційній мембрані ОПМН-П та методом флотації.

Для досягнення поставленої мети вирішували такі завдання:

- вивчити процеси осадження йонів важких металів фероціанідом калію залежно від співвідношення реагентів та реакції середовища;
- вивчити вплив полікатіонних флокулянтів на ефективність вилучення з води фероціанідів важких металів;
- оцінити вплив процесів фільтрування, нанофільтрування а флотації на ефективність доочищення води при використанні флокулянтів та фероціаніду калію.

Експериментальна частина

Як модельні використовували розчини сульфату міді (II) та свинцю (II) з концентрацією 3–5 мг/дм³, що були отримані як на дистильованій, так і водопровідній воді. Ціаноферат калію використовували в концентраціях від 1 до 15 мг/дм³, полікатіонні флокулянти додавали в концентраціях від 1 до 10 мг/дм³. Як флокулянти використовували Акватон-10, Zetag-7547, Magnefloc-5250L, Magnefloc-368 та Praestol.

Після додавання реагентів модельні розчини інтенсивно перемішували 10 хвилин, а потім відстоювали 3 години. Розчини фільтрували на фільтрах із синьою стрічкою і визначали залишкові концентрації металів. В окремих дослідах коригували рН середовища. У багатьох дослідах після фільтрування розчинів на фільтрі із синьою стрічкою та визначення вмісту металів їх доочищали на нанофільтраційній мембрані методом тупикового фільтрування. Метали визначали у воді за допомогою фотоколориметричного методу [14] та методу інверсійної вольтамперометрії [15].

У випадку використання флотації після додавання реагентів розчин відстоювали 3 години, потім проводили флотацію 20 хвилин, відділяючи піну. Воду фільтрували на фільтрі синя стрічка.

Ступінь очищення води від металу розраховували за формулою:

$$Z = \left(1 - \frac{C_3}{C_0}\right) \cdot 100, \% \quad (1)$$

де C_3 – залишкова концентрація металу в розчині; C_0 – вихідна концентрація металу в розчині.

Виклад основного матеріалу. У роботі використовували йони важких металів у відносно низьких концентраціях, оскільки одним із завдань було визначення умов ефективного видалення йонів важких металів із води та визначення рівня їх залишкових концентрацій у воді.

Як видно з рис. 1 ефективність вилучення йонів міді з води залежить не лише від співвідношення концентрацій метал-фероціанід, але і від рН середовища. Ефективність очищення зростала як при підвищенні дози фероціаніду, так і при зростанні рН середовища.

Це цілком закономірно, тому що глибина конверсії вихідних речовин, зазвичай, зростає із підвищенням концентрацій компонентів, а фероціаніди металів більш стійкі при $pH > 8$.

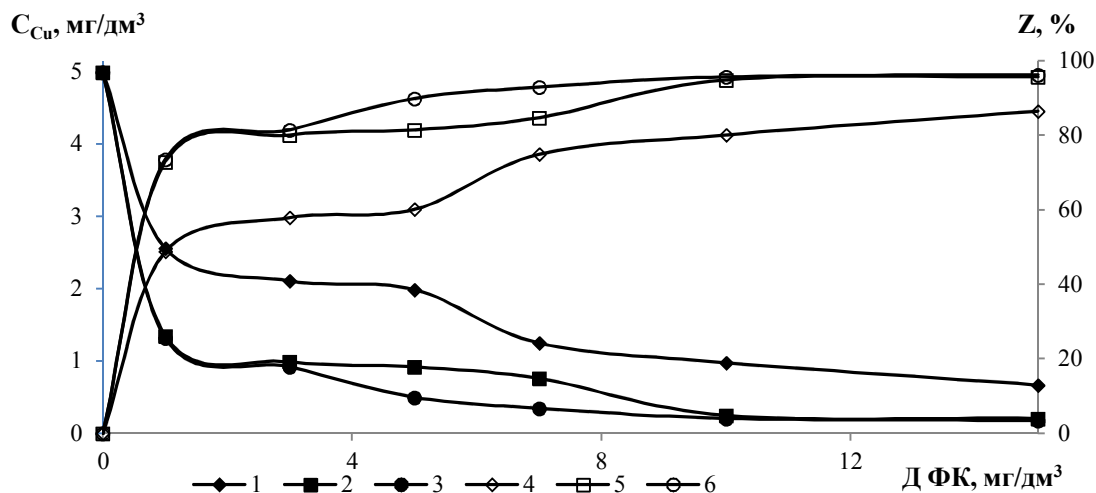


Рис. 1. Залежність залишкової концентрації йонів міді в розчині в дистильованій воді (1; 2; 3) та ступеню очищення води від міді (4; 5; 6) від дози фероціаніду калію при pH розчину 5,1 (1; 4), 8,1 (2; 5) та 9,1 (3; 6) після відстоювання та фільтрування

Разом з тим треба зауважити, що залишкові концентрації міді ($\approx 0,18\text{--}0,21$ мг/дм³) навіть у кращих дослідах значно переважають розчинність ціаноферату у воді. Скоріш за все вони здатні утворювати стійкі колоїдні системи у воді, і тому не відділяються із води ні відстоюванням, ні фільтруванням. У водопровідній воді (рис. 2), де рівень pH був досить високим – 8,1 та 9,1, ефективність очищення води від міді була навіть нижчою, ніж розчинів у дистильованій воді. Можливо в цьому випадку також значна кількість ціаноферату міді існує у вигляді стійких колоїдних систем.

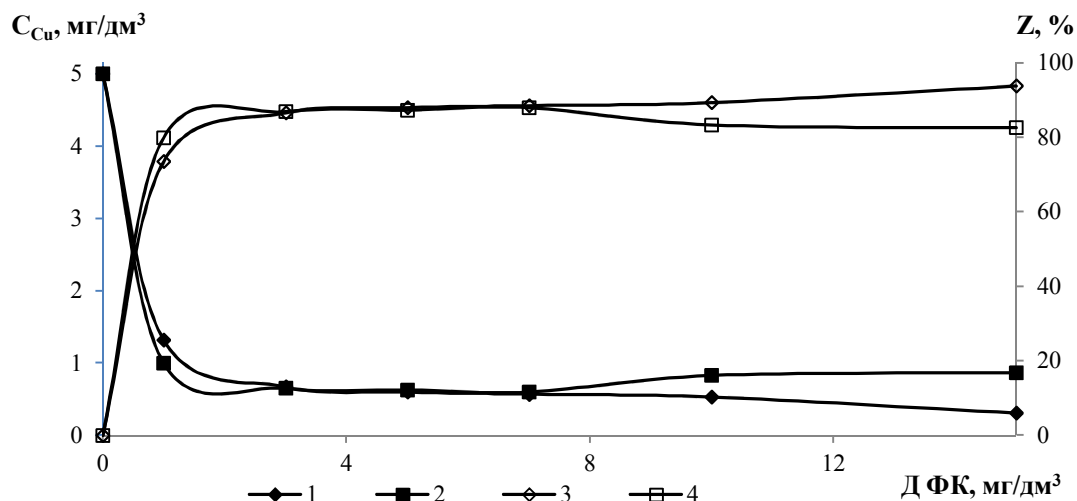


Рис. 2. Залежність залишкової концентрації йонів міді у водопровідній воді (1; 2) та ступеню вилучення йонів міді (3; 4) від дози фероціаніду калію при pH : 8,1 (1; 3), та 9,1 (2; 4) після відстоювання та фільтрування

Для підвищення ефективності очищення води, в разі присутності стійких колоїдних систем, доцільно використовувати метод нанофільтрування, який забезпечує практично повне вилучення колоїдних часток із води. Тому для підвищення ефективності очищення води була використана нанофільтраційна мембрана для доочищення води. Як видно з рис. 3 та 4, при застосуванні нанофільтрування ефективність вилучення міді та свинцю

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

виросла на 4–15 % у порівнянні зі звичайним фільтруванням. Особливо суттєво підвищилась ефективність очищення води при відносно невеликих дозах ціаноферату калію – 1–5 мг/дм³. Проте повного видалення міді було досягнуто лише при концентрації фероціаніду калію на рівні 15 мг/дм³. Для свинцю залишкові концентрації було знижено лише до 0,12–0,15 мг/дм³. Це говорить про те, що дійсно частина металів залишалась у воді у вигляді стійких колоїдів. Але певна частина іонів свинцю та міді залишалась у вигляді іонів або гідроксидів металів. У водопровідній воді ця кількість не зв'язаних іонів міді була більшою, ніж у дистильованій воді. Можливо в цьому випадку конкурентами йонам міді були йони жорсткості, концентрація яких у водопровідній воді була значно вищою за концентрацію важких металів. При жорсткості води 4–5 мг-екв/дм³ концентрації іонів жорсткості переважали вміст іонів міді в мг-екв/дм³ у 25–32 рази.

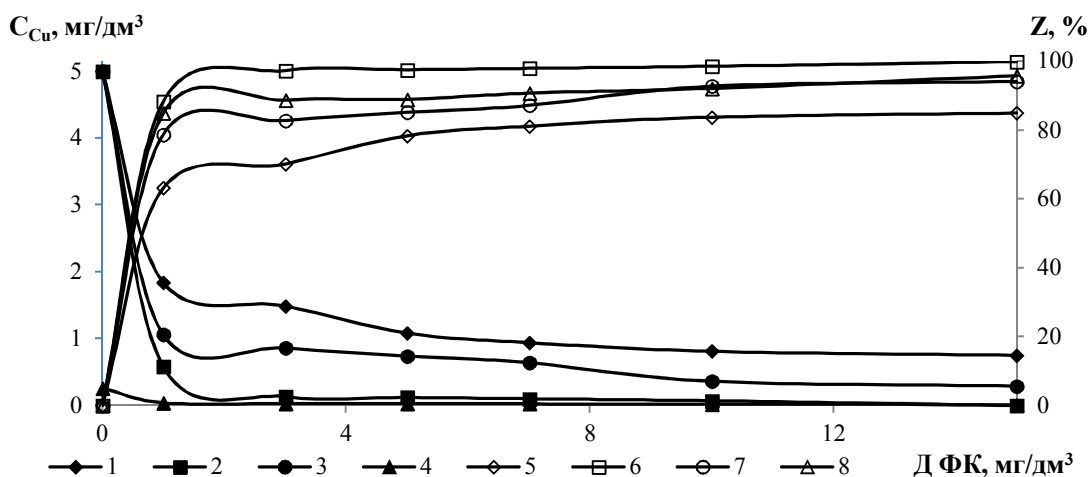


Рис. 3. Залежність концентрації іонів міді (1; 2; 3; 4) та ступеня їх вилучення (5; 6; 7; 8) з дистильованої (1; 2; 5; 7) та водопровідної (3; 4; 6; 8) води від дози фероціаніду калію при доочищенні води фільтруванням (1; 3; 5; 6) та фільтруванні й нанофільтрації (2; 4; 7; 8)

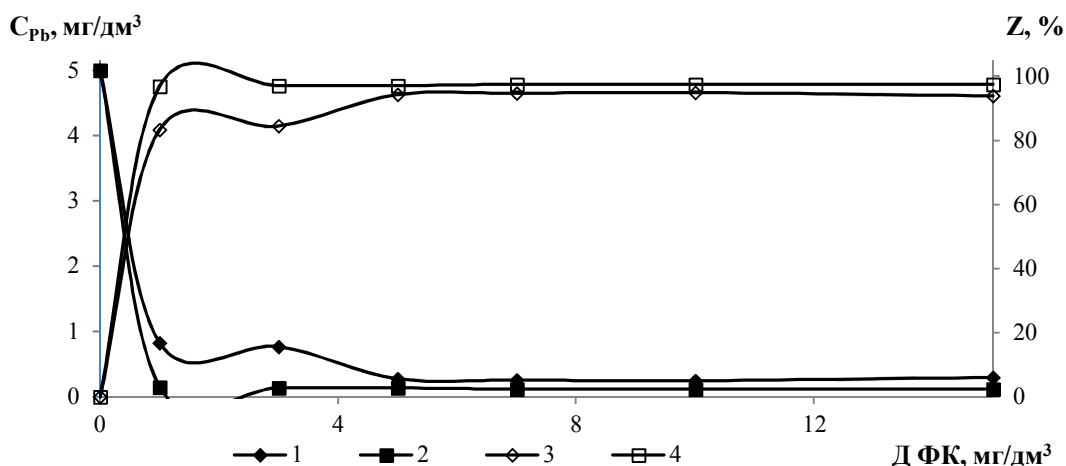


Рис. 4. Залежність концентрації іонів свинцю у дистильованій воді (1; 2) та ступеню їх вилучення з води (3; 4) від дози фероціаніду калію при доочищенні води фільтруванням на фільтрі синя стрічка (1; 3) та фільтруванні на фільтрі «синя стрічка» та нанофільтраційній мембрані ОПМН-П (2; 4)

Для підвищення ефективності вилучення з води ціанофератів важких металів доцільно було застосувати полікатіонні флокулянти, які утворюють комплексні сполуки великої молекулярної маси з ціанофератами. Для зв'язування ціанофератів нами були

використанні флокулянти Акватон-10, Zetag-7547, Magnefloc-5250L, Magnefloc-368 та Praestol (рис. 5). Як видно з рис. 5, краще фероціанід зв'язували флокулянти Акватон-10 та Zetag-7547. А в присутності йонів міді (рис. 6) кращий результат забезпечив флокулянт Zetag-7547, який при звичайному відстоюванні забезпечив зниження концентрації міді до 0,16–0,22 мг/дм³ при повному вилученні фероціаніду.

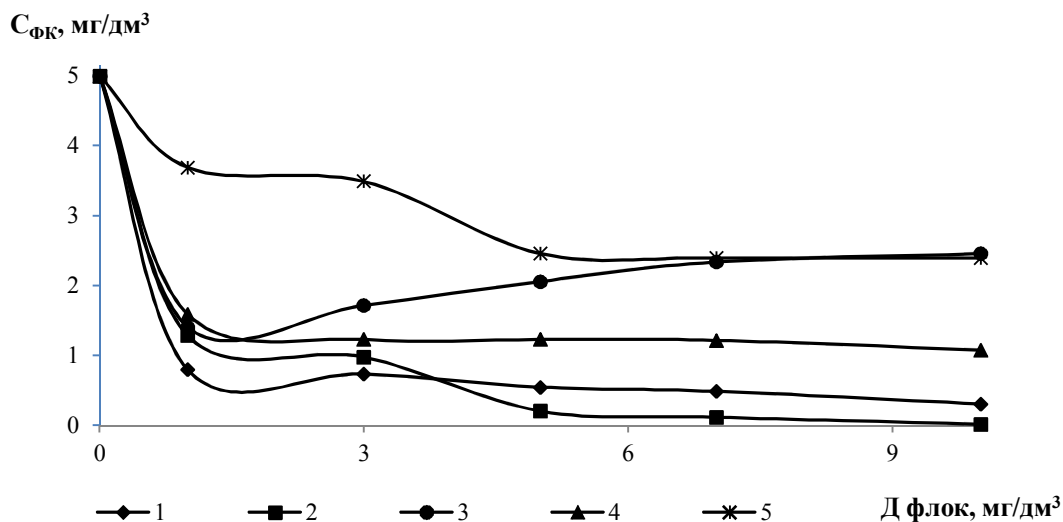


Рис. 5. Залежність залишкової концентрації фероціаніду калію (1; 2; 3; 4; 5) у розчині дистильованої води при початковій концентрації 5 мг/дм³ від дози флокулянту Акватон 10 (1), Magnefloc-368 (2), Magnefloc-52504 (3), Zetag-7547 (4), Praestol (5) після відстоювання протягом 24 годин та фільтруванні через фільтр «синя стрічка»

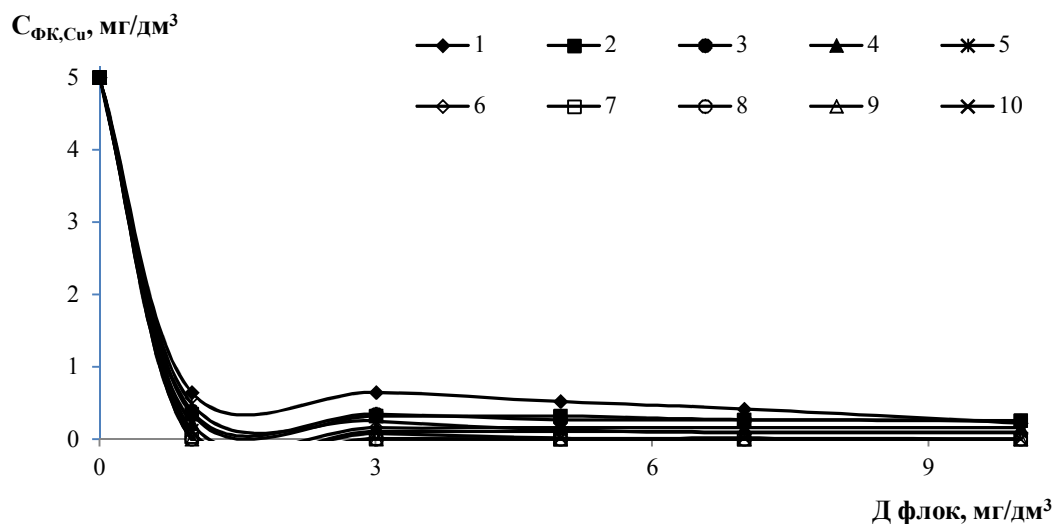


Рис. 6. Залежність залишкової концентрації іонів міді (1; 2; 3; 4; 5) та фероціаніду калію (6; 7; 8; 9; 10) від дози флокулянту (1, 6 – Акватон, 2; 7 – Magnefloc-368, 3; 8 – Magnefloc-52504, 4; 9 – Zetag-7547, 5; 10 – Praestol) після відстоювання та фільтрування

При використанні ціаноферату калію та флокулянту Zetag-7547 при нанофільтруванні було досягнуто залишкових концентрацій міді при дозі флокулянту 3 мг/дм³ а дозах ціаноферату калію 3 – 15 мг/дм³ на рівні 0,0 – 0,04 мг/дм³. Ступінь очищення міді при цьому сягав 99,2 – 100,0% (рис. 7).

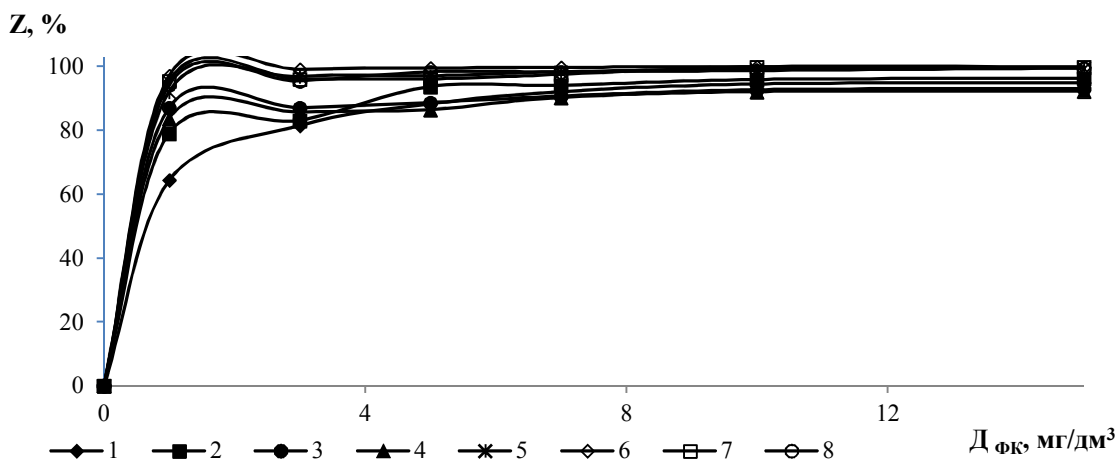


Рис. 7. Залежність ступеню вилучення іонів міді з дистильованої води (1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8) від дози фероціаніду калію при доочищенні води фільтруванням (1-4) та фільтруванням і нанофільтрацією (5-8) при дозах флокулянту Zetag-7547, мг/дм³: 1 – (1; 5); 3 – (2; 6); 5 – (3; 7); 10 – (4; 8)

Відомо, що комплекси полікатионітів із аніонними ПАР застосовують для вилучення йонів металів із води методом флотації [16]. При вилученні йонів свинцю та міді методом флотації при використанні катіонних флокулянтів та аніонного ПАР сульфонол НП-3, кращі результати отримано при вилученні йонів міді. Іони свинцю не утворюють комплексів із катіонними флокулянтами, тому ефективність їхнього вилучення з води була низькою. В основному процес очищення відбувався за рахунок утворення сполук свинцю із сульфонолом. Ступінь переходу розчину в піну зростає із дозою сульфонолу в межах від 1,5 – 7,2 %.

Треба зазначити, що суттєвою перевагою методу флотації є доцільність його застосування при очищенні вод забруднених маслами, нафтопродуктами, поверхнево-активними речовинами. Суттєво кращих результатів при очищенні води від йонів важких металів методом пневматичної флотації було досягнуто при використанні разом із катіонними флокулянтами, сульфонолом НП-3, фероціаніду калію (рис. 8). У кращих співвідношеннях реагентів досягнуто ступеню вилучення міді на рівні 97,5–98,4 %, при вилученні свинцю – 95,4–98,0 %, при вихідних концентраціях металів 10 мг/дм³. При концентрації міді 3–5 мг/дм³ залишкові концентрації металу були знижені до 0,02–0,07 мг/дм³ при ступенях вилучення 96,66–99,40 %.

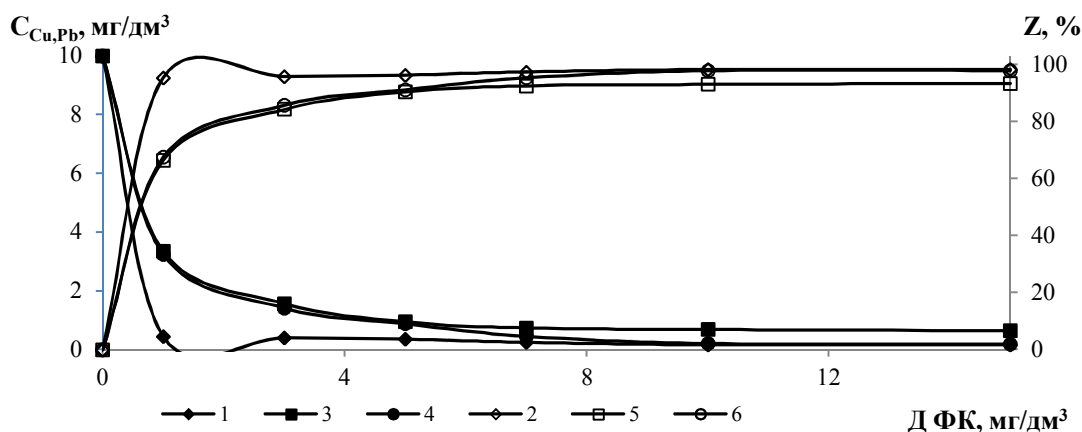


Рис. 8. Залежність залишкової концентрації міді (1) та ступеня їх вилучення (2), йонів свинцю (3) та ступеню їх вилучення (4) від дози фероціаніду калію при очищенні води напірною флотацією при дозі флокулянту Акватон 10 мг/дм³ (1; 2) та флокулянту Zetag-7547 1 (3; 5) та 3 (4; 6) мг/дм³ при витраті сульфонолу НП-3 20 мг/дм³

Таким чином, при очищенні від іонів міді та свинцю із застосуванням ціанофератних комплексів природних вод із низькою каламутністю доцільно використовувати відстоювання, механічне фільтрування та нанофільтрацію, а стічних вод, забруднених механічними домішками – флоатацією та механічне фільтрування.

Висновки відповідно до статті.

1. Досліджено процеси очищення води від важких металів при їх висадженні фероціанідом калію. Показано, що ефективність очищення зростає при збільшенні дози ціаноферату калію та при підвищенні рН середовища до 8,0 – 9,1.

2. Показано, що при очищенні води від іонів міді та свинцю шляхом комплексоутворення з ціанофератом калію при використанні нанофільтрування після відстоювання та механічного фільтрування ефективність очищення вилучення іонів важких металів зростає на 4–15 %. Більший ефект спостерігається при дозах ціаноферату калію до 7 мг/дм³.

3. Визначено ефективність зв'язування ціаноферату калію та іонів міді при взаємодії з полікатіонними флокулянтами. Застосування флокулянтів забезпечує підвищення ефективності очищення води відстоюванням та механічним фільтруванням. При доочищенні води нанофільтруванням ступінь вилучення міді становить 97,2–100,0 %.

4. Показано, що при використанні катіонних флокулянтів та аніонного ПАР (сульфонол НП-3) у процесі очищення води від іонів важких металів методом пневматичної флоатації досягнуто ступінь очищення води від міді 93–95 % та від свинцю 21–57 %. Низький ступінь вилучення свинцю обумовлений низькою здатністю свинцю до утворення комплексів із катіонними флокулянтами.

5. Встановлено, що при використанні для зв'язування іонів важких металів разом із ціанофератом калію, катіонних флокулянтів та при застосуванні для піноутворення сульфонолу НП-3 досягнуто високої ефективності вилучення металів із води. Ступінь вилучення металів зростає із підвищенням дози ціаноферату при зниженні концентрації металу у воді. Концентрацію міді було знижено до 0,02–0,1 мг/дм³, та свинцю – до 0,21 мг/дм³ при дозах ціаноферату 10–15 мг/дм³.

Список використаних джерел

1. Линник П. Н., Набиванец Б. И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 267 с.
2. Трохименко Г. Г., Цепанюк Н. В. Визначення ступеня кумуляції важких металів у гідробіонтах узького лиману. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2015. № 4. С. 98–105.
3. Серпокрьолов Н. С., Вильсон Е. В., Гетманцев С. В., Марочкин А. А. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами. Москва: Изд-во АСВ, 2009. 261 с.
4. Novel adsorbent based on silkworm chrysalides for removal of heavy metals from wastewaters / Paulino A. T. et al. *J Colloid Interf Sci*. 2006. Vol. 301. P. 479–487.
5. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance / M. Al-Shanag et al. *Chem Eng J*. 2015. Vol. 260. P. 749–756.
6. Arbabi M., Hemati S., Amiri M. Removal of lead ions from industrial wastewater: A review of removal methods. *International Journal of Epidemiologic Research*. 2015. Vol. 2(2). P. 105–109.
7. Гомеля М. Электроэкстракция тяжелых металлов из сточных вод для защиты природных водоемов от загрязнения. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. Т. 1, № 10. С. 55–61.
8. Гомеля М., Иванова В., Трус І. Ефективність вилучення іонів важких металів з розведених розчинів іонообмінним методом. *Технічні науки та технології*. 2017. № 4 (10). С. 154–162.
9. Ковальчук А., Почечун Т., Галиш В., Трус І. Фосфорилування шкаралуп волоських горіхів для підвищення ефективності очищення водних розчинів. *Технічні науки та технології*. 2018. № 2(12). С. 236–244.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

10. Филатова Е. Г. Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2015. № 2 (13). С. 97–109.
11. Strategies based on silica monoliths for removing pollutants from wastewater effluents: A review / D. Rodrigues et al. *Science of The Total Environment*. 2013. Vol. 461–462, № 9. P. 126–138.
12. Nevenka R. Removal of nickel (II) ions from aqueous solutions using the natural clinoptilolite and preparation of nano-NiO on the exhausted clinoptilolite / R. Nevenka, et al. *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 257, I. 5. P. 1524–1532.
13. Терещенко О. М., Мельниченко Є. В., Макаренко І. М. Очистка стічних вод від іонів міді методом комплексоутворення та ультрафільтрації. *Збірник наукових праць НУК*. 2017. № 2. С. 93–97.
14. Лурье Ю. Ю. Справочник по аналитической химии. 5-е изд. Москва: Химия, 1979. 480 с.
15. Определение тяжелых металлов в водных экосистемах методом инверсионной хронопотенциометрии / Суровцев И. В. и др. *Химия и технология воды*. 2009. Т. 31. № 6. С. 677–687.
16. Гомеля М. Д., Терещенко О. М. Використання комплексів катіонних полімерів з фероціанідом калію при очищенні води від радіоізотопів цезію-137 методом пневматичної флоатації. *Перспективные направления развития экологии, экономики, энергетики: сборник научных статей. ОЦНТЭИ. Одесса, 1999. С. 333–338.*

References

1. Linnik, P. N., Nabivanets, B. I. (1986). *Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodakh [Forms of metal migration in fresh surface waters]*. Leningrad: Gidrometeoizdat [In Russian].
2. Trokhymenko, G. G., & Tsyhanyuk, N. V. (2015). Vznachennia stupenia kumulatsii vazhkykh metaliv u hidrobiontakh uzкого lymanu [Determination of the degree of cumulation of heavy metals in hydrobionts of a narrow estuary]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK – Collection of scientific works of the National University of Shipbuilding*, 4, 98–105 [in Ukrainian].
3. Serpokrylov, N. S. (2009). *Ekologiya ochistki stochnykh vod fiziko-khimicheskimi metodami [Ecology of wastewater treatment by physicochemical methods]*. Moscow: DIA Assotsiatsiia stroitelnykh vuzov [In Russian].
4. Paulino, A. T. et al. (2006). Novel adsorbent based on silkworm chrysalides for removal of heavy metals from wastewaters. *Journal of colloid and interface science*, 301(2), 479–487.
5. Al-Shannag, M., et al. (2015). Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance. *Chemical Engineering Journal*, 260, 749–756.
6. Arbabi, M., et al. (2015). Removal of lead ions from industrial wastewater: A review of Removal methods. *International Journal of Epidemiologic Research*, 2(2), 105–109.
7. Gomelya, M. (2018). Elektroekstraktsiia tiazhelykh metallov iz stochnykh vod dlia zashchity prirodnykh vodoemov ot zagriaznenniia [Electroextraction of heavy metals from wastewater to protect natural water bodies from pollution]. *Vostochno-Evropejskii zhurnal peredovykh tekhnologii – East European Advanced Technology Journal*, 1(10), 55–61.
8. Gomelya, M., Ivanova, V., Trus, I. (2017). Efektivnist viluchennya ioniv vazhkykh metaliv z rozvedenix rozchiniv ionoobminnim metodom [Efficiency of extraction of heavy metal ions from diluted solutions by ion-exchange method]. *Tekhnichni nauki ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 4 (10), 154–162 [in Ukrainian].
9. Kovalchuk, A. I., Pochechun, T., Halish, V., Trus, I. (2018). Fosforilivannia shkaralup voloskikh horikhiv dlia pidvishhennia efektyvnosti ochishhennia vodnykh rozchiniv [Phosphorization of shells of walnuts to improve the efficiency of purification of aqueous solutions]. *Tekhnichni nauki ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 2 (12), 236–244 [in Ukrainian].
10. Filatova, E. G. (2015). Obzor tekhnologii ochistki stochnykh vod ot ionov tiazhelykh metallov, osnovannykh na fiziko-khimicheskikh protsessax [Review of wastewater treatment technologies for heavy metal ions based on physicochemical processes]. *Izvestiia vuzov. Prikladnaia khimiia i biotekhnologiya – News of universities. Applied chemistry and biotechnology*, 2 (13). 97–109 [In Russian].
11. Rodrigues, D., Rocha-Santos, T. A. P., Freitas, A. C., A. Gomes, M. P., Duarte, A. C. (2013). Strategies based on silica monoliths for removing pollutants from wastewater effluents: A review. *Science of the Total Environment*, 461, 126–138.

12. Nevenka, R., Stojakovic, D., Jovanovic, M., Zabukovec, N., Mazaj, M., Kaucic, V. (2010). Removal of nickel (II) ions from aqueous solutions using the natural clinoptilolite and preparation of nano-NiO on the exhausted clinoptilolite. *Applied Surface Science*, 257(5), 1524–1532.
13. Tereshchenko, O. M., Melnychenko, Ye. V., Makarenko, I. M. (2017). Ochistka stichnikh vod vid ioniv midi metodom kompleksoutvorennya ta ultrafiltratsii [Purification of sewage from copper ions by the method of complex formation and ultrafiltration]. *Zbirnik naukovix prac NUK – Collection of scientific works of NUS*, 2, 93–97 [in Ukrainian].
14. Lure, Yu. Yu. (1979). *Spravochnik po analiticheskoi khimii [Handbook of Analytical Chemistry]*. Moscow: Khimiia [In Russian].
15. Surovcev, I. V. et. al. (2009). Opredelenie tiazhelykh metallov v vodnykh ekosistemakh metodom inversionnoi khronopotentsiometrii [Determination of heavy metals in aquatic ecosystems by the method of inversion chronopotentiometry]. *Khimiia i tekhnologiya vody – Water Chemistry and Technology*, 31(6), 677–687 [in Russian].
16. Gomelya, M. D., Tereshhenko, O. M. (1999). Vykorystannia kompleksiv kationnikh polimeriv z ferotsianidom kaliyu pri ochistsi vodi vid radioizotopiv tseziuu-137 metodom pnevmatichnoi flotatsii [Use of complexes of cationic polymers with potassium ferrocyanide during water purification from radioisotopes of cesium-137 by pneumatic flotation]. *Perspektivnye napravleniya razvitiya ekologii, ekonomiki, energetiki – Perspective directions of development of ecology, economy, energy*. Odessa. 333–338 [in Ukrainian].

UDC 504.5:628.33

Inna Trus, Nikolai Gomelya, Yevheniia Melnychenko, Valeriia Mihranova

WATER PURIFICATION FROM HEAVY METAL IONS USING SEDIMENTATION, NANOFILTRATION AND FLOTATION

Urgency of the research. The problem of a declining ecological situation is becoming more and more relevant. Thus, the priority direction is the development of effective methods which can be used in water purification from heavy metal ions.

Target setting. To date, existing methods of the removal of heavy metal ions from water solutions are suitable mainly for the treatment of industrial wastewater and are not efficient for the purification of natural waters containing high concentrations of calcium and magnesium ions, which significantly reduce the capacity of ion exchangers regarding the heavy metal ions.

Actual scientific researches and issues analysis. Recent publications in open access were taken into consideration, including literature on the main methods of purification and after-treatment of water from heavy metal ions.

Uninvestigated parts of general matters defining. Information on the purification effectiveness of natural water containing high concentrations of calcium and magnesium ions.

The research objective. We also carried out a study of the copper and lead ions removal efficiency from dilute aqueous solutions using potassium ferrocyanide and flocculants within the methods of settling, flotation, filtration on a blue tape filter and on the OPMN-P nanofiltration membrane.

The statement of basic materials. The processes of water purification from heavy metals during their sedimentation using potassium ferrocyanide are investigated. It has been shown that when purifying water from copper and lead ions by chelation method with potassium ferricyanide using nanofiltration after settling and mechanical filtration, the efficiency of the removal of heavy metal ions increases. The efficiency of binding between potassium ferricyanide and copper ions in interaction with polycationic flocculants was studied.

Conclusions. The results of investigations on the extraction of heavy metal ions (for example, copper and lead) are derived from heavy metals in solubilization by binding to ferrocyanide complexes with their subsequent sedimentation and purification using filtration and nanofiltration methods. It is shown that the application of nanofiltration can increase the rate of water purification from copper and lead ions by 4 - 15%. The high efficiency of water purification from heavy metals was provided by the method of flotation.

Keywords: heavy metal; flocculants; potassium ferrocyanide; nanofiltration; chelation; flotation.

Fig.: 8. References: 16.

Трус Інна Миколаївна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Trus Inna – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of ecology and technology of plant polymers, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: inna.trus.m@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6368-6933>

ResearcherID: I-3204-2017

Scopus Author ID: 56152219600

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Гомеля Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедрою екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Gomelya Nikolai – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of ecology and technology of plant polymers, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (7 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: m.gomelya@kpi.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1165-7545>

Scopus Author ID: 6507653734

Мельниченко Євгенія Володимирівна – молодший науковий співробітник кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Melnychenko Yevheniia – Junior Researcher of Department of ecology and technology of plant polymers, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (7 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).

E-mail: jenny_666@live.ru

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0363-6824>

Мігранова Валерія Олегівна – студент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна).

Mihranova Valeriia – student, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (7 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine).